

Beitrag zur Erhöhung der Standzeit der Arbeitsorgane von Gutbett- Walzenmühlen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(akademischer Grad)

Dr.-Ing.
(Kurzform)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Hanstein
geboren am 29.05.1967 in Bleicherode

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Bast, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. D. Besser, Dresden
Dr.-Ing. G. Stehr, Remscheid

Freiberg, den 18. 05. 2001
(Tag der Verleihung)

Danksagung

An dieser Stelle danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. D. Besser und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Bast für die hilfreiche Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt weiterhin den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhles für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen, des Institutes für Aufbereitungsmaschinen und des Institutes für Mechanik und Maschinenelemente der Technischen Universität Freiberg.

Danken möchte ich auch der Stiftung Industrieforschung für die finanzielle Unterstützung, den Mitarbeitern der Maschinenfabrik Köppern GmbH und der Köppern Aufbereitungstechnik GmbH, Herrn Steidel von der Firma Freiburger Präzisionsmaschinen GmbH und Herrn Streller mit seinen Mitarbeitern vom Steinbruch Friedrichswalde für die jederzeit freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner ganzen Familie, allen voran meiner Frau Andrea für ihre Hilfe und Unterstützung und vor allem für das entgegengebrachte Verständnis für meine Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Allgemeine Aussagen	7
1.2	Problem und Aufgabenstellung	9
2	Dreikörper-Abrasivverschleiß	11
3	Verschleißprüfung - Problemstellung und Ziele	21
4	Gutbett-Walzenmühlen	24
4.1	Grundlagen der Gutbett-Technologie	24
4.2	Derzeitiger Erkenntnisstand zum Betriebsverhalten	28
4.2.1	Zerkleinerungsverhalten	28
4.2.2	Einzugsverhalten	33
4.2.3	Durchsatz	36
4.2.4	Kräfte an den Walzen und Druckverteilung	38
4.3	Derzeitiger Erkenntnisstand zum Verschleißverhalten	45
4.3.1	Verschleißmechanismen	45
4.3.2	Verschleißschutz	51
4.3.2.1	Die aufgeschweißte Hartpanzerung	52
4.3.2.2	Aufgeschrumpfte Bandagen	54
4.3.2.3	Auswechselbare Segmente	56
4.3.2.4	Rasterpanzerung (Stud lining)	58
5	Versuchsdurchführung	61
5.1	Konzeption der Versuchsanlage	61
5.2	Aufbau der Versuchsanlage	62
5.3	Versuchsplanung	65
5.4	Einführende Versuche	66
5.4.1	Strategie	66
5.4.2	Verschleißmessung	67
5.4.3	Aussagen zu aufgenommener Leistung und Durchsatz	70

5.4.4	Bestimmung der Verschleißintensität	73
5.4.5	Schlußfolgerungen für die weiteren Versuche	75
5.5	Durchführung von Verschleißversuchen mit unterschiedlichen Auftragsschweißwerkstoffen und Abrasiven	76
5.5.1	Versuchsplanung	80
5.5.2	Segmentaussehen nach den Versuchen	82
5.5.3	Versuchsergebnisse	85
5.5.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der auftraggeschweißten Werkstoffe	88
5.6	Entwicklung von Hexadur®	89
5.6.1	Versuchsdurchführung mit Hexadur® - WT1 und WT2	91
5.6.1.1	Änderung der Verschleißmessung	91
5.6.1.2	Verschleißergebnisse von WT1 und WT2	94
5.7	Zusammenfassung der Betrachtungen zum Verschleiß	97
5.8	Aussagen zu aufgenommener Leistung und Durchsatz	98
5.9	Praxisrelevanz der Versuchsergebnisse	103
6	Zusammenfassung	105

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
α	Kraftangriffswinkel	°
α_0	Winkel zur Definition der Kompressionszone	°
β	Kraftangriffswinkel	°
δ_s	Feststoffvolumenanteil im engsten Spalt	-
η	Verdichtung	-
Θ	Normierte Verdichtung	-
κ	dimensionsloser Quotient	-
λ	dimensionsloser Quotient	-
λ^*	dimensionsloser Quotient	-
ρ	Reindichte des Aufgabegutes	g/cm ³
ρ_0	Ausgangsschüttdichte	g/cm ³
ρ_f	Enddichte	g/cm ³
ρ_s	Reindichte	g/cm ³
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹
$1-\varepsilon$	Schichtdichte	-
B	Walzenbreite	m
D	Walzendurchmesser	m
d_k	Korngröße	mm
d_{max}	Maximale Korngröße	mm
F	Mahlkraft	N
F_r	Radialkraft	N
F_{sp}	Spezifische Mahlkraft	N/mm ²
F_t	Tangentialkraft	N
g(d)	Grenzfunktion	%
H_A	Härte des Abrasivs	HV
H_W	Härte des Werkstoffs	HV
L	Beanspruchungslänge	m
l	Wegstrecke	mm

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
M	Durchsatz	t/h
m	Spezifischer Durchsatz	t/m ³
P	Antriebsleistung	kW
P _{spez}	Spezifische Zerkleinerungsleistung	kWh/t
P _{zer}	Zerkleinerungsleistung	kW
p	Preßdruck	N/mm ²
p _{max}	Maximaler Preßdruck	N/mm ²
p	Spezifischer Druck	N/mm ²
s	Spaltweite	mm
T _A	Antriebsmoment	Nm
T _{sp}	Spezifisches Antriebsmoment	N/mm ²
u	Walzenumfangsgeschwindigkeit	m/s
v	Geschwindigkeit	m/s
W	Verschleiß	mg
1/W _r	Relativer Verschleißwiderstand	-
x	Partikelgröße	mm
x _{max}	Maximale Partikelgröße	mm

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Aussagen

Schon frühzeitig wurde die enorme volkswirtschaftliche Bedeutung der Verluste durch Verschleiß erkannt.

Kreher, L. und Wahl, H. stellten im Jahr 1943 fest, daß die Art und Weise der Schadensbehebung uneinheitlich und mehr oder weniger zufällig erfolgte. Ein Grund dafür war der fehlende Erfahrungsaustausch [1, 2]. Erstmals wurde ein Gesamtplan erstellt, der zur Minderung der verschleißbedingten Unkosten beitragen sollte. Er umfaßt Schulung, technische Forschung und wirtschaftliche Gesichtspunkte einschließlich statistischer Betrachtungen. Ziel von Erhebungen in den Bereichen von Konsum und Produktion war es, besonders stark betroffene Gebiete für eine vordringliche Verschleißbekämpfung ausfindig zu machen. Enorme Schwierigkeiten bei der Durchsetzung ihrer genialen Idee führten zu der Erkenntnis, daß die Zeit dafür noch nicht reif war.

1950 nahm Vogelpohl [3] eine Einschätzung der jährlich für die deutsche Volkswirtschaft durch Reibung und Verschleiß anfallenden Verluste auf mehrere Milliarden Mark vor. Bereits 1975 wurden die Verluste in einer Studie namens "Tribologie" des BMFT auf insgesamt 10 Milliarden DM geschätzt, davon allein für Abrasivverschleiß auf 5 Milliarden. Erstmals konkrete Erhebungen wurden 1984 veröffentlicht. In ihnen wird der volkswirtschaftliche Verlust in den von Abrasion und Erosion betroffenen Industriezweigen auf mindestens 6,4 Milliarden DM beziffert [4].

Die konsequente praktische Umsetzung tribologischer Erkenntnisse, insbesondere auf den Gebieten von Abrasion und Erosion, können zu Einsparungen im Bereich von 10 bis 20 % führen [5].

In Zeiten der Hochkonjunktur wurden derartige Gedanken zugunsten der Produktionsausweitung und der Rationalisierung in den Hintergrund gedrängt.

Begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen und wirtschaftliche Gegebenheiten brachten in jüngerer Zeit die Frage nach Möglichkeiten der Kostensenkung durch tribologische Maßnahmen hervor.

Für jede Relativbewegung sich berührender Körper ist Energie notwendig. Sie ist ein

Maß für deren Wechselwirkung. Das Verschleißgeschehen wird maßgeblich vom Grad und von der Art der Wechselwirkung bestimmt.

Für geschlossene Systeme, beispielsweise Gleitlager, ist es möglich, die Oberflächen der Partner ihrer Funktion entsprechend hinsichtlich des Werkstoffes und der Form aneinander anzupassen. Zusätzlich wird in der Regel durch Schmierung ein reibungs- und verschleißarmer Zustand erreicht.

Bei offenen Systemen (z. B. Schürfwerkzeuge) hingegen ist es, neben verfahrenstechnischen und betrieblichen Maßnahmen, lediglich möglich, nur das Bauteil hinsichtlich der Konstruktion und Werkstoffwahl auf die jeweilige Funktion abzustimmen. Dagegen muß der Gegenkörper (Abrasive) mit seinen charakteristischen "Konstruktions- und Werkstoffmerkmalen" hingenommen werden. Die verschleißbestimmenden Merkmale dieser Systeme sind abrasive und erosive Beanspruchung.

Der oft hohe Verschleiß ist ein Resultat zahlreicher Grundoperationen in der Verfahrens- und Aufbereitungstechnik. Hier werden Rohstoffe, wie Kohle und Erz etc., abgebaut und über mehrfach wiederholbare Verfahrensschritte wie Fördern, Brechen, Klassieren, Waschen, Mahlen, Trocknen, Mischen, Transportieren und Lagern in den gewünschten Zustand versetzt. Die Arbeitsorgane der zahlreichen benötigten Anlagen kommen mit dem, aus vielen Teilchen bestehenden, abrasiv und erosiv wirkenden Gut in Berührung. Dieser Fakt erklärt die immense Bedeutung der Verschleißminimierung für die Volkswirtschaft.

Vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit werden die durch Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen entstehenden Personalkosten immer gewichtiger. So können sich Mehraufwendungen für verschleißfestere Werkstoffe oder für konstruktiv optimierte Bauteile rasch amortisieren.

Auch ist die Schulung des Personals hinsichtlich der optimalen Betriebsweise einer Anlage eine wesentliche Voraussetzung, da durch die Bedienung das auf die einzelnen Komponenten einwirkende Beanspruchungskollektiv, die Beanspruchungsdauer und -häufigkeit in weiten Bereichen beeinflußt werden können.

1.2 Problem und Aufgabenstellung

Seit ihrer industriellen Einführung im Jahre 1985 erlangt die Gutbett-Walzenmühle, auch Walzen- oder Rollenpresse genannt, eine immer stärker werdende Bedeutung innerhalb der Reihe der Zerkleinerungsmaschinen. Haupteinsatzgebiet dieser Mühlen ist die Zerkleinerung spröder Materialien vorrangig in der Steine- und Erden- sowie in der Zementindustrie. Anfangs ergänzte man vorhandene Mahlanlagen für Zement und Hochofenzement durch vorgeschaltete Gutbett-Walzenmühlen, um die Leistung der Anlagen zu steigern und den Energieverbrauch zu senken. Inzwischen sind Gutbett-Walzenmühlen für zahlreiche andere Aufgaben im Einsatz, wie z. B. beim Brechen von Kimberlit zum Aufschluß von Diamanten bzw. zur Mahlung von verschiedenen Erzen oder Steinkohle. Der große Erfolg der Gutbetttechnologie beruht in erster Linie auf dem geringen spezifischen Energieverbrauch und der einfachen Einbindung solcher Mühlen in bestehende Mahlsysteme. So kann die Energieeinsparung gegenüber Kugelmühlen bis zu 50 % betragen. Weitere Vorteile sind der hohe Gutdurchsatz bei geringem Bauvolumen, geringe Lärmemissionen sowie geringer spezifischer Verschleiß.

Nachdem der Einsatz von Gutbett-Walzenmühlen anfangs nur in Form der Vormahlung und Hybridmahlung erfolgte, sind sie heutzutage zunehmend in Kombimahlanlagen oder bei der Fertigmahlung in einem geschlossenen Kreislauf von Gutbett-Walzenmühle und Sichter zu finden, d. h. in einigen Mahlanlagen hat die Gutbett-Walzenmühle die Kugelmühle bereits vollständig abgelöst.

Aufgrund des enormen Einsparungspotentials dieser Mühlen gibt es umfangreiche Bemühungen, Gutbett-Walzenmühlen in weiteren Industriebereichen zur Zerkleinerung anderer, härterer Materialien einzusetzen. Diesbezüglich existieren jedoch erst wenige Erkenntnisse über das Verschleiß- und Zerkleinerungsverhalten in Abhängigkeit von technologischen Parametern wie Preßdruck, Durchsatz, Umfangsgeschwindigkeit oder Zerkleinerungsverhältnis.

Die Kenntnis des Verschleiß- und Zerkleinerungsverhaltens bei der Mahlung harter und mittelharter Materialien soll genutzt werden, um in Zukunft Gutbett-Walzenmühlen maschinen- und verfahrenstechnisch richtig auszulegen, damit sie den gestiegenen Anforderungen gerecht werden können.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, grundlegende Merkmale des Betriebs-, Verschleiß- sowie Zerkleinerungsverhaltens der Gutbett-Walzenmühle bei der Zerkleinerung mittelharter bis harter Materialien zu untersuchen.

Hierzu wird im ersten Teil der Arbeit eine ausführliche Literaturrecherche zum wissenschaftlich-technischen Erkenntnisstand über die Themen Verschleiß und Gutbettzerkleinerung durchgeführt. Bei der Betrachtung des Schwerpunktes Verschleiß wird verstärkt auf die für die Gutbettzerkleinerung charakteristische Art des Dreikörper-Abra- sivverschleißes eingegangen.

Im zweiten Teil werden nach einem noch genauer zu beschreibenden Versuchsprogramm Versuche zur Bestimmung des Verschleiß- und Zerkleinerungsverhaltens in Abhängigkeit verschiedener technologischer Parameter durchgeführt.

Schließlich werden die gewonnenen Erkenntnisse mit dem vorhandenen Wissen verglichen, um eventuelle Übereinstimmungen und Parallelen zu finden und allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

2 Dreikörper-Abrasivverschleiß

Beim Dreikörper-Abrasivverschleiß werden die Oberflächen von Grund- und Gegenkörper, die sich relativ zueinander infolge Gleiten, Rollen bzw. Stoßen bewegen, durch dazwischen befindlichen Abrasivstoff beansprucht. Eine direkte Berührung von Grund- und Gegenkörper wird teilweise oder gar ganz verhindert, jedoch bleibt eine Einflußnahme über den Abrasivstoff bestehen.

Diese Art des Verschleißes ist anzutreffen:

- C unvermeidbar bei verfahrenstechnischen Prozessen, z. B. beim Zerkleinern in Kugelmühlen, Backenbrechern, Walzenbrechern, Gutbett-Walzenmühlen etc.,
- C unbeabsichtigt in Tribosystemen infolge Eindringen abrasiv wirkenden Gutes, beispielsweise zwischen Kettenglieder von Becherwerksketten oder von Staub oder Schmutz etwa in Lager, Führungen, Getriebe [6].

Bezeichnung	Abrasive-Gleitverschleiß			Abrasive-Stoßverschleiß	Dreikörper-Abrasivverschleiß		
	(Zweikörper-Abrasivverschleiß)						
Symbol							
Grundkörper 1	verschleißende Festkörperoberfläche						
Gegenkörper 2	Rauheitsspitzen eines massiven Abrasivstoffes (Gestein)	Abrasivstoff gebunden	Abrasivstoff lose (Schüttung mit Kornkollektiv)	Abrasivstoff massiv (Rohgut)	verschleißende Festkörperoberfläche		
Zwischenstoff 3	-				fest (körnig)		
Umgebungsmedium	flüssig, gasförmig						
Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper	gleiten	gleiten	gleiten rollen strömen	stoßen gleiten	gleiten	rollen, wälzen	stoßen, gleiten
Bewegung des Abrasivstoffes	gleiten	gleiten	gleiten rollen	stoßen gleiten	gleiten, rollen		gleiten, rollen, stoßen
Beanspruchungsmerkmal	vorgegebene Kraft	vorgegebene Kraft	vorgegebene Kraft	vorgegebene Energie	vorgegebene Kraft	vorgegebene Kraft vorgegebener Weg	vorgegebener Weg vorgegebene Energie
relative Beanspruchungsintensität	hoch	hoch	niedrig	sehr hoch	niedrig, hoch	niedrig, hoch	sehr hoch
Beispiele aus der Praxis	Gesteinsbohren, Baggerzahn	Pressen feuerfester Steine (Schleifen, Honen)	Feststofftransport in Rinnen, Rutschen, Röhren	Übergabestellen beim Feststofftransport, Prallplatten	unerwünschte Prozesse in Lagern, Gelenken, Führungen (Läppen)		
Beispiele für Prüfsysteme	Werkzeug/Gestein	Schleifpapierverfahren	Verschleißtopfverfahren	Stoßeinrichtung für Massengüter	Klotz/Ring Klotz/Rad	Walze/Walze Walze/Ebene Modellkugelmühle	Modellbackenbrecher
Kategorie	IV	V	IV	III/IV	VI	IV	IV

Abb.1: Vergleich der Merkmale von Abrasive-Gleit-, Abrasive-Stoß- und Dreikörper-Abrasivverschleiß

Die wesentlichsten Kennzeichen dieser Verschleißart werden in der Abbildung 1 mit dem Abrasive-Gleitverschleiß und dem Abrasive-Stoßverschleiß verglichen.

Zwischen Grundkörper, Abrasiv und Gegenkörper einerseits und andererseits zwischen Grund- und Gegenkörper bestehen vielfältige Wechselwirkungen.

Durch Makrogeometrie, Kornabstand, Belastung, Bewegung, Kornform und Systemsteifigkeit

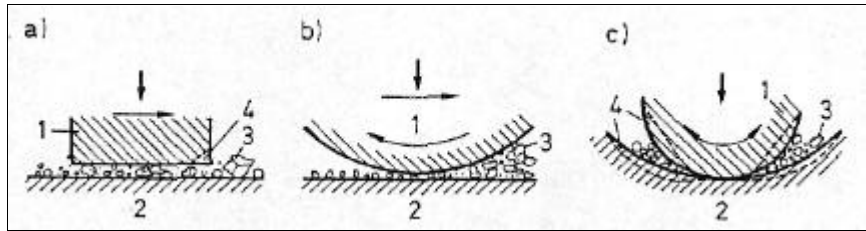


Abb.2: Beispiele von Spaltgeometrien beim Dreikörper-Abrasivverschleiß
 1...Grundkörper; 2...Gegenkörper; 3...Zwischenstoff; 4...Erosionszone

wird bestimmt, welche Korngrößen in den Spalt gelangen bzw. welche Korngrößen sich im Spalt infolge der äußeren Belastung einstellen und Verschleiß verursachen (Abb. 2 a, b, c).

Makrogeometrie und Spalt sind ständigen Form- und Größenänderungen unterworfen, die sowohl durch Verschleiß als auch durch Belastungsschwankungen hervorgerufen werden. Durch diesen Effekt können Körner unterschiedlicher Größe in den Spalt gelangen. Im Einzugsbereich vor dem Spalt stauen sich die Körner durch das quasi vorliegende Überangebot oder durch ungeeignete Größe. Diese Körner verursachen Erosionsprozesse, die unter Umständen mit relativ hohen Kraftwirkungen ablaufen. Die Bilder 3, 4,



Abb.3: Verschleiß im Gelenk eines Rundstahlkettengliedes



Abb.4: Nahaufnahme der verschlissenen Oberfläche des Kettengliedes

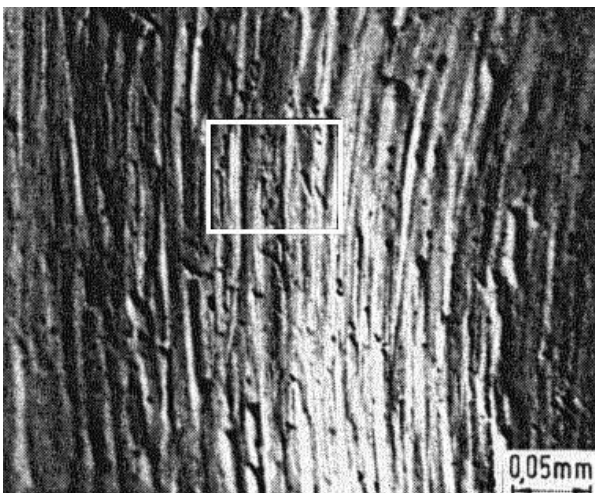


Abb.5: Erosionsbereich mit Riefen, Einsatzhärtungszone abgetragen (Abb.4e vergrößert)

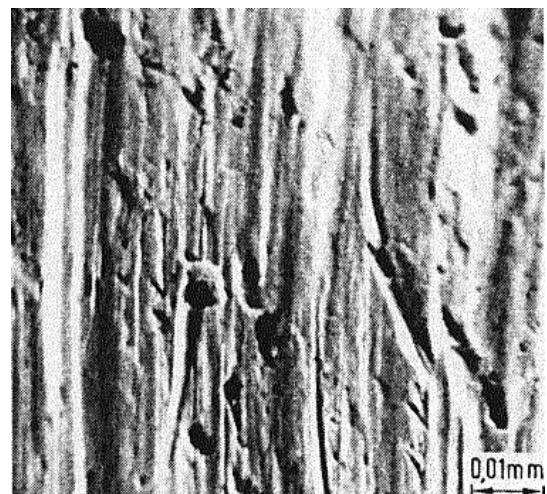


Abb.6: vergrößert Erosionsbereich aus Abb.5

5 und 6 sollen den Effekt der geschilderten Prozesse verdeutlichen.

Bei umlaufenden Bewegungen können die Auswirkungen durch im Spalt ablaufende Prozesse überdeckt werden.

Körner, die kleiner sind als der Spalt, werden kaum beansprucht und bewirken dadurch geringen Verschleiß. Spaltgroße Körner hingegen rufen höchsten Verschleiß hervor. Über sie können die maximal möglichen Kräfte übertragen werden, die letztlich auch den Bruch der Körner bewirken können. Dies kann auch schon im Einzugsbereich vor dem engsten Spalt stattfinden.

Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen mit unterschiedlichen Werkstoffen und Prüfeinrichtungen lassen schematisch einen Zusammenhang zwischen Korngröße des Abrasivs und dem aufgetretenen Verschleiß erkennen [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Er kann in 3 Bereiche eingeteilt werden (Abb.7):

Je nach Werkstoffhärte kann im Bereich I (ohne Abrasivstoff bzw. mit sehr feinkörnigen Abrasivstoffen) ein relativ großer Verschleißbereich beobachtet werden.

Es schließt sich ein korngößenabhängiger Bereich II an. Für den Fall $H_A > H_W$ (Verschleißhochlage) nimmt der Verschleiß bis zu einer systemabhängigen Größe von 30...150 μm zu. Keine Korngößenabhängigkeit ist bei $H_A < H_W$ (Verschleißtieflage). Dies resultiert aus geringer Abrasivität und Kornfestigkeit sowie aus der Abnahme der Adhäsionskomponente.

Gänzlich korngößenunabhängig ist der Bereich III, der sowohl für $H_A < H_W$ als auch für $H_A > H_W$ zutrifft, aber mit einem unterschiedlich hohen Niveau des Verschleißes.

Im Bereich I und ohne Abrasiv findet aufgrund von Metall-Metall-Kontakt adhäsiver Verschleiß und Triboxidation statt. Für Stähle ergibt sich in Abhängigkeit von Härte, Adhäsionsneigung und Luftfeuchtigkeit ein Verschleißbereich, der mehrere Größenordnungen

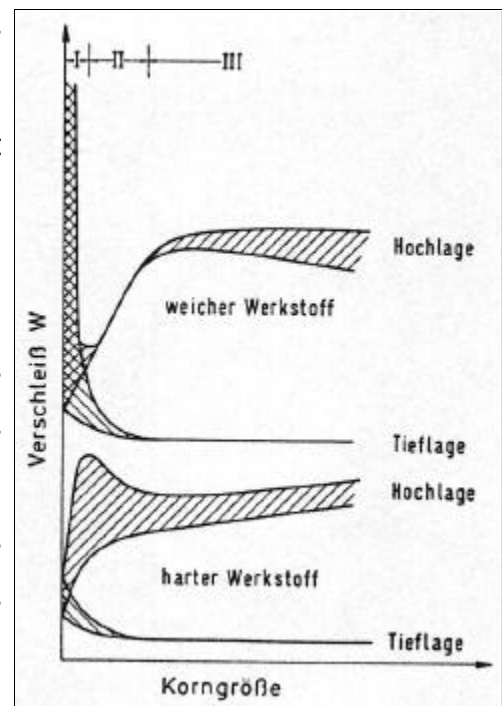


Abb.7: Darstellung der Korngrößenabhängigkeit des Dreikörper-Abrasivverschleißes

umfassen kann [13].

Bei geschmierten Systemen findet man die Adhäsionskomponente nicht. Dort fehlt gar der Bereich I.

Kommen jedoch Abrasive mit sehr kleinen Korngrößen zwischen die Werkstoffpaarung, so wird der Anteil Adhäsion zugunsten eines Anteils milder Abrasion vermindert [9]. Der Verschleiß wird für $H_A > H_W$ höhere Werte annehmen, für $H_A < H_W$ niedrigere als ohne Abrasiv. Voraussetzung dafür ist, daß die Menge an eingedrungenem Abrasiv noch nicht in der Lage ist, den Metall-Metall-Kontakt gänzlich aufzuheben.

Für die Bereiche II und III und $H_A > H_W$ muß momentan noch mit Hypothesen gearbeitet werden, da die dort ablaufenden Vorgänge noch nicht gesichert gedeutet werden können:

- C Im korngößenabhängigen Bereich II und $H_A > H_W$ wird die Kraft hauptsächlich über sehr viele Körner eingeleitet. Es sind sowohl elastische als auch plastische Kontakte beteiligt [14].
- C Steigt die Korngröße an, verteilt sich die Last auf immer weniger Körner. Die Zahl der plastischen Kontakte nimmt zu und folglich auch der Verschleiß. Für den Bereich III gilt, daß praktisch keine elastischen Kontakte mehr auftreten. Hier wird sehr schnell eine aus dem Vorgang Belastung/Zerkleinerung resultierende Korngröße eingestellt.

Den Zerstörungs- und Zerkleinerungsprozessen kommt besondere Bedeutung zu. Sie finden artspezifisch, korngößen- und -mengenabhängig als Einzel-, Schicht- oder Gutbettzerkleinerung bzw. als Kombination dieser statt.

Untersuchungen zur Einzelkornzerkleinerung haben ein strukturabhängiges Verhalten aufgezeigt, was durch einen un stetigen Verlauf der Kraft-Weg-Kurven charakterisiert wird (Abb. 8). Besonders ist dies bei sehr harten und spröden Stoffen wie beispielsweise Quarzit ausgeprägt [6, 15]. So liegen auch die Quarzbruchstücke vereinzelt auf der für die Versuche verwendeten Druckplatte, wohingegen bei Kalkstein die Bildung einzelner Agglomerate zu beobachten ist. Kennzeichen für die Agglomeratbildung ist ein

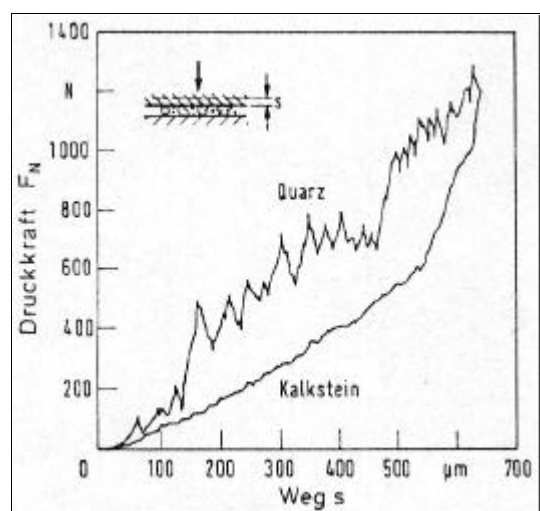


Abb.8: Druckverlauf in Abhängigkeit vom Weg bei der Beanspruchung einer Lage von je 50 1,1 mm großen Quarz- und Kalksteinkörnern [6]

steiler Kraftanstieg (ab einem Verformungsweg von ca. 500 μm). Mit abnehmender Korngröße wird die Anzahl der Fehlstellen im Korn geringer. Das führt zu einer Zunahme der Druckfestigkeit und kann eine sehr viel höhere Beanspruchung der Kontaktstelle bedeuten [6, 15, 16, 17, 18].

Der Einfluß der Korngröße nimmt bei der Zerkleinerung eines ganzen Kornkollektivs ab, jedoch werden bei gleichem Zerkleinerungsgrad (Verhältnis von Ausgangs- zu Endkorngröße) höhere Druckfestigkeiten infolge gegenseitiger Beeinflussung der Körner beobachtet [19].

Überlagert man der Druckbeanspruchung eine Gleitbewegung, wird die Druckfestigkeit der Körner durch die eingebrachten Scherkräfte bzw. -spannungen gemindert [20].

Die Steigerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit (Annäherungsgeschwindigkeit von Grund- und Gegenkörper) bewirkt eine Zunahme der Reaktionskraft und folglich der Zerkleinerungsarbeit durch kompakter ausgebildete Bruchstückhaufen [21].

Die zur Zerstörung aufzubringende Belastung ist gleichfalls von der Werkstoffhärte abhängig und nähert sich einem Grenzwert (Abb. 9) [18].

Die für einen Bruch der Körner ausschlaggebende Spannungskonzentration ist eine Funktion der Belastung, des Härteverhältnisses von Grund- und Gegenkörper zum Abrasiv und der davon abhängigen Kontaktstellengröße (Abb. 10 a...d).

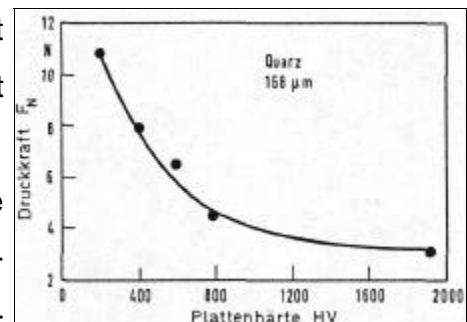


Abb.9: Abhängigkeit der zur Zerstörung von Quarzkörnern erforderlichen Druckkraft von der Plattenhärte [18]

Das Bruchverhalten des Abrasivs wird sehr entschei-

dend durch das Umgebungsmedium beeinflusst. Sieht man von tribochemischen und korrosiven Beanspruchungen metallischer Werkstoffe und chemischen Veränderungen

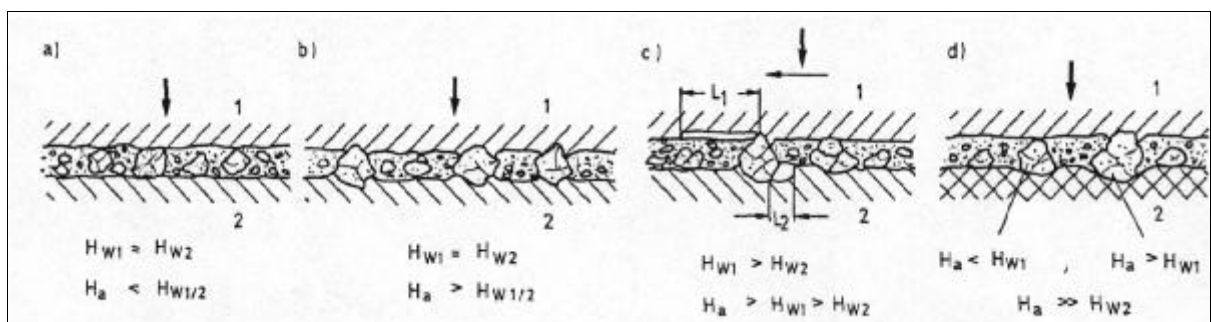


Abb.10: Kontaktstellenausbildung in Abhängigkeit vom Härteverhältnis H_W/H_a
1...Grundkörper; 2...Gegenkörper

von Polymerwerkstoffen ab, spielen gewisse entfestigende Wirkungen eine große Rolle [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Es werden sich unterschiedliche Beanspruchungsintensitäten einstellen, bei denen das Korn entweder weitestgehend

unbeschädigt bleibt bzw. nur leichte Ausbrüche an den Kanten erfährt oder aber in eine Vielzahl von Einzelkörnern mit deutlich geringerer Korngröße zerkleinert wird. Die Auswirkungen

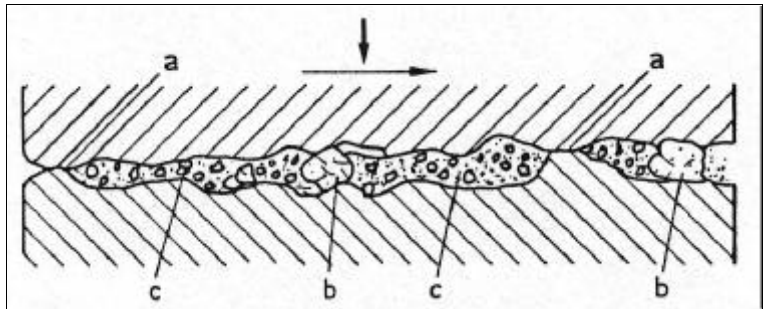


Abb.11: Modell der verschiedenen Kontaktarten beim Dreikörper-Abrasivverschleißsystem [7]

auf die Höhe des Verschleiß-

ßes und auf die beeinflussten Oberflächenbereiche werden unterschiedlich hoch sein. Mit Hilfe von durchgeführten Beobachtungen und Verschleißanalysen von beanspruchten Flächen können beim Dreikörper-Abrasivverschleiß 3 voneinander unabhängige Kontaktarten unterschieden werden (Abb. 11) [7]:

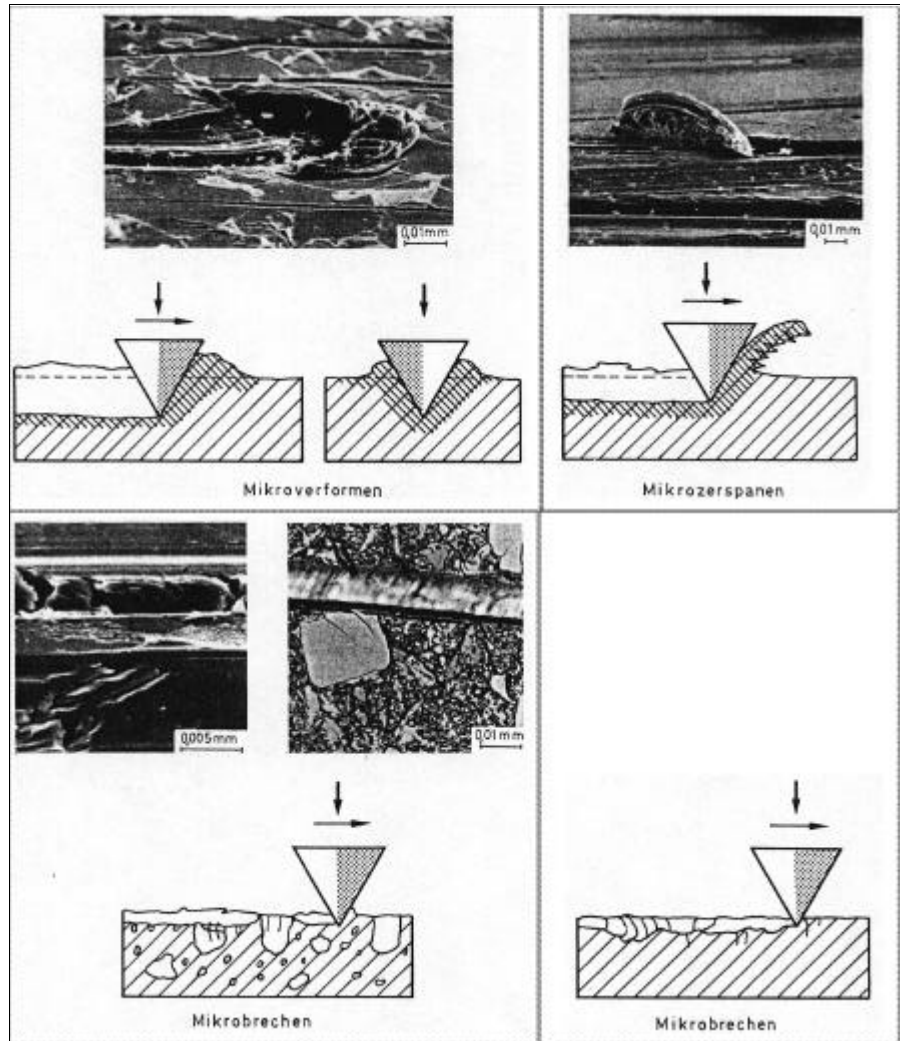
- a) Direkter Kontakt der Grenzflächen von Grund- und Gegenkörper (Metall-Metall-Verschleiß)
- b) Kontakt zwischen Grund- und Gegenkörper über ein Einzelkorn
- c) Kontakt zwischen Grund- und Gegenkörper über ein Kornkollektiv (Gutbett)

Anteil jeder der drei Kontaktarten ist hauptsächlich abhängig von den mechanischen Eigenschaften aller 3 Partner, von Art und Größe der Belastung, der Relativbewegung von Grund- und Gegenkörper und der Korngrößenverteilung des Abrasivs.

Zu beachten ist, daß der Gleitweg des ungebundenen Kornes nicht gleich dem Gleitweg von Grund- und Gegenkörper ist. Bei reinen Rollbewegungen geht der Gleitweg gar gegen null.

Von den mechanischen Eigenschaften sowohl der Festkörperoberflächen, als auch der Abrasive wird abhängen, in welcher Art und Größe die Schädigung der Grenzflächen erfolgt, ob es sich um Verformung, Mikrozerspannung bzw. Mikroausbrüche handelt. Alle 3 Schädigungsarten werden durch Gleit-, Roll- und/oder Stoßbewegungen der Körner hervorgerufen (Abb. 12).

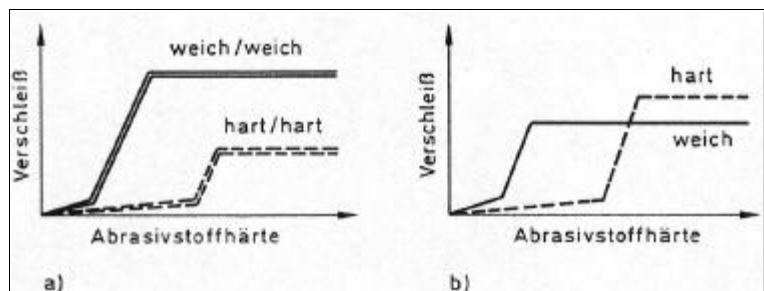
Geltung hat für den Dreikörper-Abrasivverschleiß theoretisch auch die Tieflage-Hochlage-Charakteristik (Abb. 13a). Hier ist allerdings anzumerken, daß die Ausbildung des Hochlagenplateaus nicht so eindeutig ausgeprägt ist wie beim Abrasiv-Gleitverschleiß, da der reine Furchungsprozeß durch die geschilderten Vorgänge im Spalt überdeckt wird. So kommt es



beispielsweise dazu, daß bei ungleicher

Abb.12: Formen des abrasiven Verschleißes (für Mikrobrechen gilt: links Werkstoff mit harten Phasen, rechts keramischer Werkstoff)

Härte von Grund- und Gegenkörper und härterem Abrasivstoff der härtere Körper schneller verschleißt. Die Relativbewegung zwischen abrasivem Korn und weicherem Körper wird infolge des Einbettungseffekts vermindert oder sogar stellenweise verhindert und führt zu einer Verlagerung in Richtung des härteren Werkstoffs. Dieses Phänomen kann eine Verschiebung des Hochlagenverschleißes bewirken (Abb. 13b). Der hier dargestellte Kurvenverlauf charakterisiert das Verschleißverhalten homogener Werkstoffe.



Für heterogene Werkstoffe mit

Abb.13: Theoretischer Verlauf der Tieflage/Hochlage-Charakteristik
a) Paarung gleicher Härte; b) Paarung ungleicher Härte

harten Phasen hingegen weicht der Graph im Bereich des Anstiegs und der Hochlage ab. Während sich der Verschleiß der vergleichsweise weichen Matrix in der Hochlage befindet, ist er für die Hartphasen in der Tieflage einzustufen. Als Resultat wird man einen verzögerten Verschleißanstieg erhalten, in manchen Fällen gar nur eine andeutungsweise erkennbare Hochlage.

Der Verschleiß solch heterogener Werkstoffe kann durch gezielte Variation von Werkstoffparametern wie Härte, Größe, Form und Anteil der Hartphasen, Härte und Anteil der Matrix bei gleichzeitiger Kenntnis der Daten des Abrasivs beeinflusst werden. Besonders wichtig ist dabei das Verhältnis "Freier Karbidabstand/Korngröße" bzw. "Karbidgröße/Korngröße". Davon nämlich hängt ab, in welchem Umfang die Matrix von den Karbiden geschützt wird.

Neben der Kornhärte hat die Kornform einen nicht unwesentlichen Einfluß auf die Höhe des Verschleißes. In der Tieflage spielt sie eine eher untergeordnete Rolle. Dem Korn wird sehr schnell eine Form aufgeprägt, die aus dem Vorgang resultiert. In der Hochlage hingegen bleibt die ursprüngliche Kornform, bedingt durch die höhere Festigkeit des Abrasivs, länger erhalten.

Die Kenntnis des Einflusses der Abrasivität und speziell der Kornform des Abrasivs auf das Verschleißverhalten ist im Betrieb für die Vorhersage von Abtragshöhen von entscheidender Bedeutung.

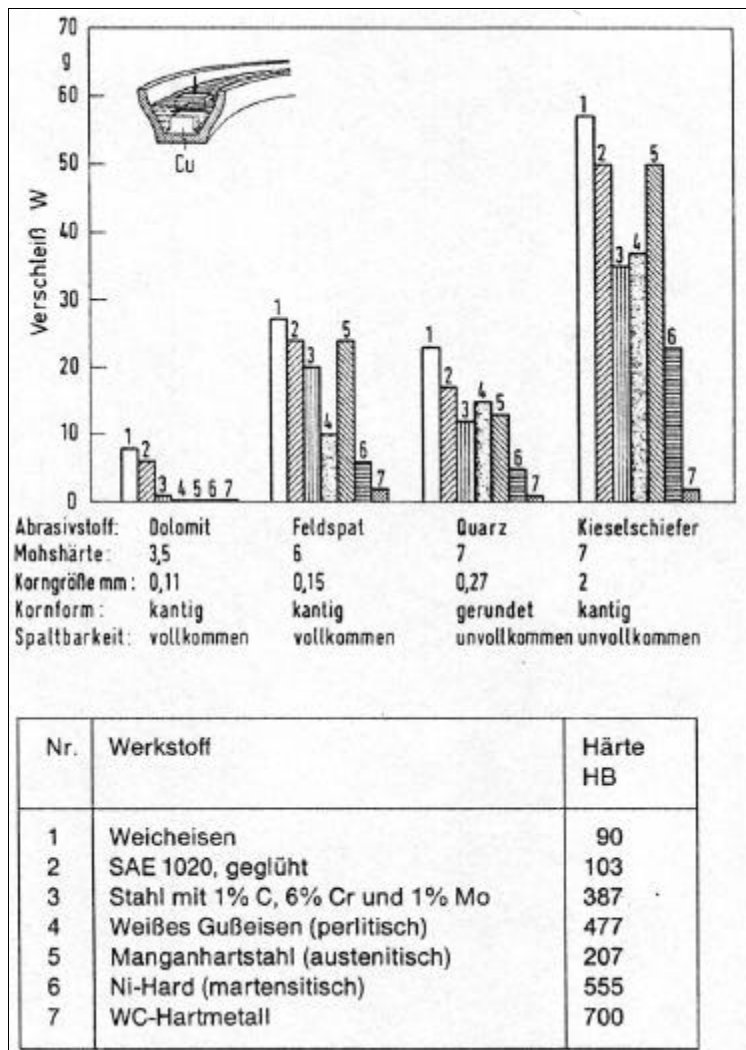


Abb.14: Verschleiß verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Abrasivstoffhärte; Klotz/Ring-Verfahren; $d_k = 0,25-0,3$ mm; Wasser/Abrasivstoff = 1,55; $p = 0,37$ N/mm²; $v = 0,6$ m/s [30]

ger scharfkantig ausgebildet sein. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein scharfkantiges Korn im Einzugsbereich des Spaltes erfaßt wird, ist wesentlich höher als bei einem gerundeten Korn.

Bei niedriger Beanspruchungsintensität durchgeführte Versuche mit gebrochenem und rundem Quarz verdeutlichten die um ein Vielfaches höhere Abrasivität des scharfkantigen gebrochenen gegenüber dem gerundeten Quarz [29].

Sogar der zusätzlich getestete weichere gebrochene Feldspat erbrachte höhere Verschleißwerte als der gerundete Quarz.

Homogene und hartphasige Werkstoffe zeigen unter hoher Beanspruchungsintensität bei Nutzung verschiedener Abrasive unterschiedlich hohen Verschleiß (Abb.14) [30].

Bei gleicher Mohshärte 7 (Kieselschiefer und Quarz) traten teilweise beträchtliche Unterschiede im Verschleißverhalten auf. Genauso gab es trotz unterschiedlicher Härte (Quarzit 7, Feldspat 6) nur geringe Verschleißdifferenzen. Diese Ergebnisse haben ihre Ursachen in unterschiedlicher Kornform und Korngröße des Abrasivs, wodurch die Charakteristik der Tief- und Hochlage überdeckt wird.

Unterschiedliche Auswirkungen hat die Kornform im gebundenen und im losen Zustand (Abb.15) [31]. Das wird deutlich, wenn man das Schleifpapier- und das Gummirad-Verfahren gegenüberstellt. Bei Verwendung unlegierter Stähle (perlitischer, bainitischer, martensitischer Struktur) erhält man mit kantigem Korn zwischen beiden Verfahren mit steigender Werkstoffhärte wachsende Unterschiede bezüglich des Verschleißwiderstandes. Beim Gummirad fallen sie größer aus als beim Schleifpapier.

Mit dem Gummirad-Verfahren kann man eine größere Differenzierung erzielen.

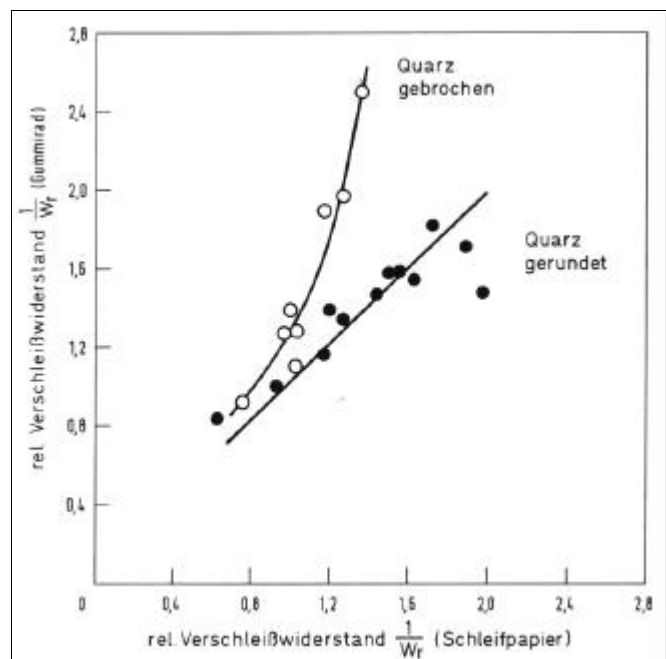


Abb.15: Vergleich des relativen Verschleißverhaltens unlegierter Kohlenstoffstähle unterschiedlicher Mikrostruktur und Härte bei gerundetem und gebrochenem Quarz

Folgende Möglichkeiten bieten sich werkstoffseitig, um die Verschleißbeständigkeit zu erhöhen:

- C Erhöhung der Härte durch Steigerung des C-Gehaltes und durch Wärmebehandlung bei unlegierten Stählen
- C Verwendung karbidhaltiger Stähle mit einer durch Wärmebehandlung beeinflussten Matrix (martensitisch, restaustenitisch)
- C unlegierter und legierter Hartguß mit einer durch Wärmebehandlung beeinflussten Matrix
- C Hartauftragsschweißungen (hoher Gehalt an harten Phasen, austenitisch-martensitische Matrix)
- C Hartmetalle (höchster Karbidanteil, zähnharte Matrix)

3 Verschleißprüfung - Problemstellung und Ziele

Durch jahrzehntelange Arbeiten auf dem Gebiet der Tribologie haben die gewonnenen Ergebnisse einen relativ hohen Stand erreicht. Dabei sind nicht nur Betriebserfahrungen eingeflossen, sondern auch zahlreiche systematisch im Betrieb und Labor durchgeführte Verschleißprüfungen.

Aufgrund des, trotz erstmaliger Vorstellung im Jahre 1941 [32], fehlenden Systemdenkens führten viele solcher Versuche zu Fehlschlägen und damit zu keinem direkt verwertbaren Ergebnis.

Eine Verschleißprüfung wird aus den unterschiedlichsten Gründen durchgeführt. Daraus ergeben sich auch unterschiedliche Ziele, die in den folgenden Punkten aufgezeigt werden:

- â Optimieren von Bauteilen bzw. tribotechnischen Systemen zum Erreichen einer vorgegebenen, verschleißbestimmten Gebrauchsdauer¹
- ã Bestimmen verschleißbedingter Einflüsse auf die Gesamtfunktion von Maschinen bzw. Optimieren von Bauteilkonstruktionen und tribotechnischen Systemen (z. B. Beanspruchung, Kinematik, Werkstoffe, Schmierstoffe) zum Erreichen einer vorgegebenen Funktion¹
- ä Schaffung von Daten für die Instandhaltung und das Festsetzen von Intervallen für Inspektion und Instandhaltung¹
- å Überwachung der verschleißbedingten Funktionsfähigkeit von Maschinen (Diagnostik)¹
- æ Simulation des Verschleißes tribologisch beanspruchter Bauteile mit Hilfe von Modellsystemen²
- ç Erkennen von Einflüssen auf die Gesamtfunktion des zu simulierenden Systems²
- è Vorauswahl von Werkstoffen und Schmierstoffen für praktische Anwendungsfälle²
- é Erforschung von Grenzflächenvorgängen, mechanismenorientierte Verschleißprüfung²
- ê Qualitätssicherung von Werkstoffen und Schmierstoffen. Die Verschleißprüfung hat dabei das Ziel, Qualitätsanforderungen an Werkstoffe und Schmierstoffe in Form konkreter Merkmale zu ermitteln und damit Vorgaben für die Qualitätskontrolle von Werkstoffen und Schmierstoffen zu liefern.²

Als besten Weg zum Ziel schätzt man in der Verschleißtechnik den Betriebsversuch ein, der aber schwerwiegende Nachteile hat [33]:

1. Erheblicher Zeitaufwand, oft über Monate oder sogar Jahre hohe Kosten

¹ Betriebsversuch

² Modellversuch

2. Geschultes Personal erforderlich
3. Schwerfälligkeit, da Parameter im allgemeinen nicht unabhängig voneinander getrennt untersucht werden können
4. Keine Konstanz in den Betriebsbedingungen, z. B. durch Änderung des Fördergutes. Dadurch ist das Verständnis für die Versuchsergebnisse oft erschwert.
5. Große Streuung der Versuchswerte
6. Häufige Änderung im Tribosystem über die Lebensdauer. Zusätzliche Verschleißarten stellen sich ein bzw. lösen die Hauptverschleißart gänzlich ab, beispielsweise durch Änderung der Geometrie infolge Verschleiß.

Die unterschiedlichen Verschleißprüfmethode dienen der Erstellung von Unterlagen für die Instandhaltung, aber auch der Diagnose von Betriebszuständen.

Stellenweise können aufgrund besonderer Schwierigkeiten keine Betriebsversuche durchgeführt werden. Andererseits lassen sich die durch Betriebsversuche ermittelten Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf scheinbar gleichartige Fälle übertragen, da schon geringe Abweichungen in den Parametern das Verschleißverhalten der Bauteile stark beeinflussen können.

Die Komplexität der Beanspruchungen und die komplizierten physikalisch-chemischen Vorgänge, die in der Berührungzone eines Verschleißsystems stattfinden, zwingen zur Schaffung vereinfachter Systeme und zur Durchführung von Modellversuchen.

Die Abbildung des Betriebssystems in verschiedenen stark abstrahierten Modellen ist ein wesentlicher Bestandteil der Verschleißprüftechnik. Jedoch bedarf es, bedingt durch die unterschiedliche Bewährung eines Werkstoffes bei verschiedenen Modellprüfverfahren, einer kritischen Auswertung der Ergebnisse (Abb.16, 17, 18) [34].

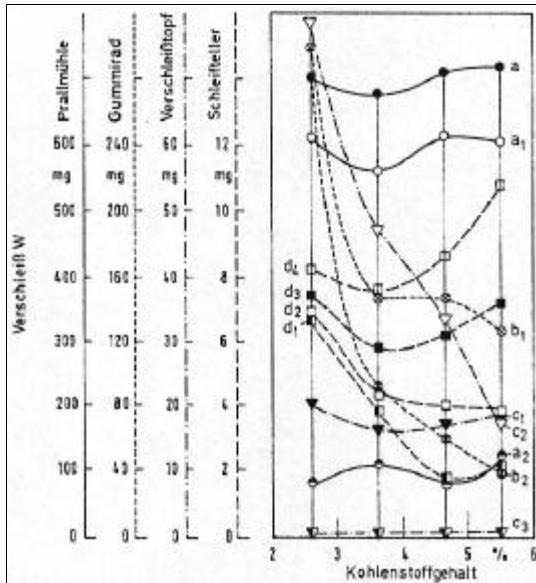


Abb.16: Hartguß mit 30 % Cr bei verschiedenen Kohlenstoffgehalten

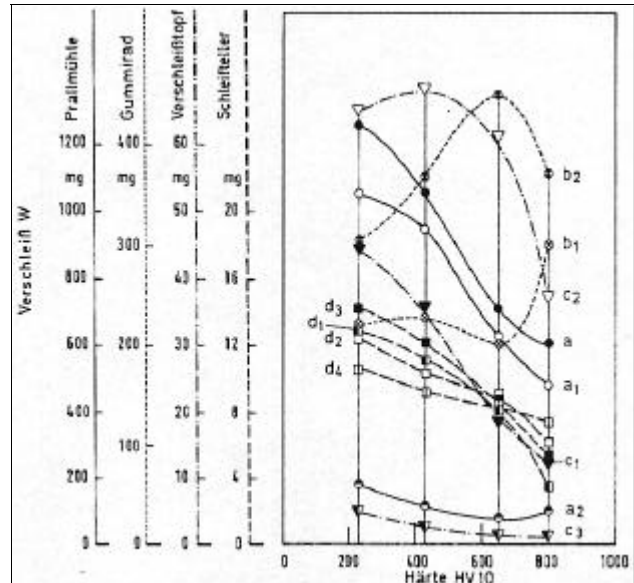


Abb.17: Stahl X210Cr12, durch Wärmebehandlung erzeugte unterschiedliche Härte

Verfahren	Prallmühle	Gummirad	Verschleißtopf	Schleifpapier
Bezeichnung der Verschleißkurven	Taunusquarzit a Gesamtverschleiß a ₁ Stoßanteil a ₂ Gleitanteil	Quarz 0,9–1,2 mm b ₁ naß b ₂ trocken	c ₁ Neckarsand (0–7 mm): Wasser = 5 : 1 c ₂ Quarz 0,9–1,2 mm c ₃ Quarz 0,06–0,3 mm	d ₁ Flint d ₂ Granat d ₃ Korund d ₄ Silizium-Karbid Körnung 80

Abb.18: Verschleißprüfung mit verschiedenen Verfahren und Abrasiven

4 Gutbett-Walzenmühlen

4.1 Grundlagen der Gutbett-Technologie

Der Mahlprozeß in der Gutbett-Walzenmühle beruht auf dem Prinzip der determinierten Druckbeanspruchung des Mahlgutes in Form eines Gutbettes zwischen zwei gleich großen, gegensinnig und mit gleicher Geschwindigkeit rotierenden Walzen.

Die Mühlen bestehen im wesentlichen aus folgenden Komponenten, wie in Abb.19 dargestellt:

- ! zwei Walzen (a) mit Lagern und Lagergehäusen (b)
- ! Rahmen (c) mit Ober- und Untergurten, Stützen und Querholmen
- ! Hydrauliksystem mit Ölbehälter (d), Ölpumpe (e), Hydraulikzylindern (f) und Stickstoffspeichern (g)
- ! Getriebe (h) für beide Walzen (oft auf die Welle aufgesteckte Planetengetriebe mit Drehmomentstützen, (i))
- ! Kraftübertragung (j) (z.B. durch Keilriemen oder Kardanwelle)
- ! Elektromotoren (k)
- ! Füllschacht (l)

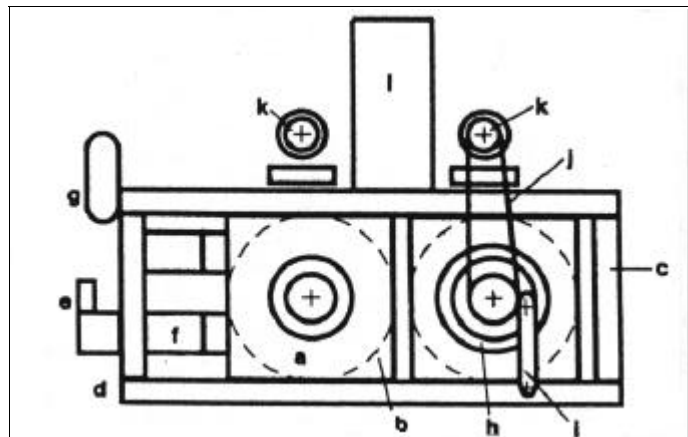


Abb.19: Schema einer Gutbett - Walzenmühle

Eine der Walzen ist in dem geschlossenen Maschinenrahmen seitlich verschiebbar, so daß sich im Betrieb die Breite des Mahlspaltes und der Preßdruck in Abhängigkeit von den Mahlguteigenschaften frei einstellen lassen [35].

Es gibt verschiedene Antriebskonfigurationen. Für kleinere Leistungen bis 300 kW je Walze wird im allgemeinen ein Keilriemenantrieb verwendet. Bei größeren Antriebsleistungen wird vorzugsweise der Gelenkwellenantrieb verwendet [36]. Die Maschinenfabrik Köppern hingegen vertritt ein anderes Konzept, indem sie die Walzen mit Kuppelstangen und Bogenzahnkupplungen über ein Zweiwegegetriebe antreibt [37].

Die Wellen sind meist in schweren doppelreihigen Pendelrollenlagern spezieller Aus-

führung und neuerdings auch in mehrreihigen Zylinderrollenlagern in Verbindung mit einem Axiallager abgestützt. Sofern keine besonderen Anforderungen bestehen, werden Gutbett-Walzenmühlen in der Regel durch Kurzschlußläufer-Motoren mit konstanter Drehzahl angetrieben.

Die zur Zerkleinerung erforderliche Mahlkraft wird von Hydraulikzylindern erzeugt und über die verschiebbare Walze auf das Gutbett übertragen [35]. Der dadurch im Gutbett erzeugte maximale Druck liegt je nach Material und Anforderung an das Fertiggut zwischen 50 MPa und 500 MPa. Dabei bilden sich im Gutbett sowohl axial (Abb. 20 oben) als auch radial (Abb. 20 unten) typische Druckprofile aus [38].

Ein wesentliches Merkmal der Gutbettzerkleinerung ist, daß das größte Korn des Aufgabegutes kleiner sein kann als der Spalt zwischen den Mahlwalzen, d. h., das Material wird im Gutbett durch den extrem hohen Druck zerkleinert, ohne daß es die Oberfläche der Walzen berühren muß.

Wenn das Aufgabegut kleiner als die Schülpenstärke ist, so erfolgt reine Gutbettzerkleinerung. Sind die Aufgabepartikel größer als die Schülpenstärke, so geht der Gutbettzerkleinerung eine vorgeschaltete Einzelpartikelzerkleinerung voraus.

Man teilt den Raum zwischen den Walzen in drei Bereiche auf, die Beschleunigungs-, die Kompressions- und die Rückdehnungszone (Abb. 21). Von der Austrittsöffnung des Aufgabeschachtes an wird das Gut beschleunigt, der Mahlgutstrom eingeeengt und durch den hohen Druck beansprucht. Die Beschleunigungszone erstreckt sich vom Aufgabeschachtaustritt bis zu

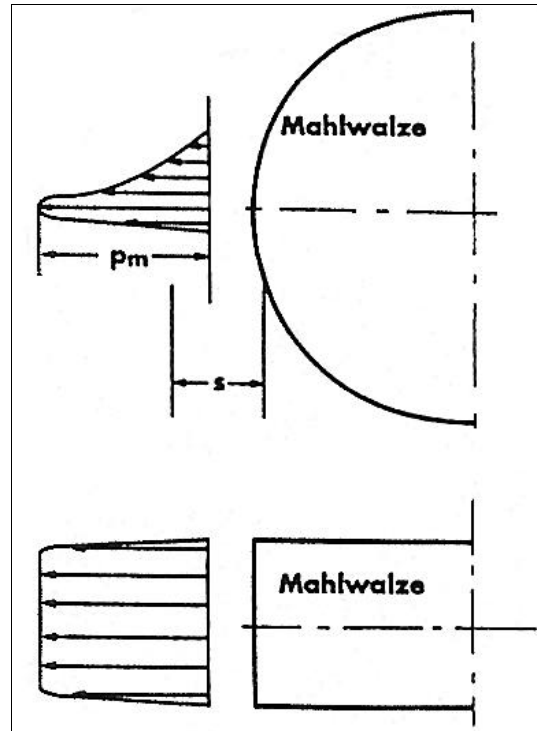


Abb.20: oben: axiale Druckverteilung
unten: radiale Druckverteilung

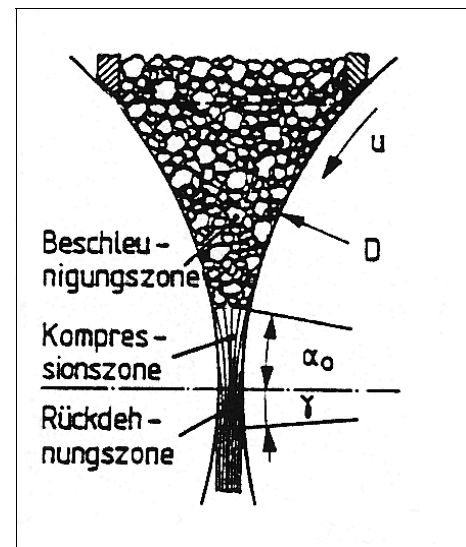


Abb.21: Schema des Walzenspaltens

dem Winkel α_0 , die Kompressionszone schließt sich dort an und verläuft bis zum engsten Spalt $\alpha = 0^\circ$ und die Rückdehnzone wird durch $\alpha = 0^\circ$ und den Rückdehnwinkel γ begrenzt [35].

Das Mahlgut wird bei einem definierten spezifischen Arbeitsbedarf im Mahlspalt verdichtet. Die dabei auftretenden Kräfte sind von den Einzugsbedingungen, der Mahlguthomogenität über der Walzenbreite und dem Kompressionsverhalten abhängig. An der Mahlwalze wirken Druckkräfte, die als Normalkräfte wirken und Umfangskräfte, die als Reib- und Schubkräfte auftreten. Da die als Umfangskräfte auftretenden Reibungskräfte nur 3-4 % der auftretenden Druckkräfte betragen, sind sie für die Belastung der Mahlwalzen von untergeordneter Bedeutung.

Deshalb kann die Beanspruchung der Walzen anhand der Normalkraft bzw. der maximalen Flächenpressung beurteilt werden (siehe Abb. 20 oben und unten). An der engsten Stelle des Mahlspaltes, beziehungsweise geringfügig darüber, wird der höchste Druck erreicht. Die Beanspruchung der Mahlwalzen gleicht somit einem Druckstoß mit einem Maximum am engsten Mahlspalt. Darüber hinaus wird die Grundbeanspruchung durch Schwingungen überlagert, die durch Bruchvorgänge im Mahlgut hervorgerufen werden [38]. Diese Schwingungen und verschiedenen Betriebszustände sind von KHD Humboldt Wedag als Ergebnis einer Langzeitmessung des Loswalzendrehmomentes dokumentiert worden (Abb.22).

- ! Oben links: Normalbetrieb Klinker;
- ! Oben rechts: ebenfalls Klinker, eine Spitzenbelastung ("Knallen") der Maschine verursacht durch Einzelkornzerkleinerung (Hierbei treten lokale Überpressungen auf, wodurch Randbereiche entlastet werden und das Mahlgut den Walzenspalt teilweise ohne Druckaufnahme passiert.)
- ! Unten links: Normalbetrieb bei Hüttensand mit wesentlich geringerer Belastungsbandbreite
- ! Unten rechts: große Belastungsbandbreite ("Rattern") verursacht durch Homogenitätsschwankungen, verbunden mit großen Spaltweitenänderungen [39].

In Gutbett-Walzenmühlen beträgt die Verweildauer innerhalb der Hochdruckzone nur einige Zehntel Sekunden. Auf über der Zeitachse wechselnde Eigenschaften des Auf-

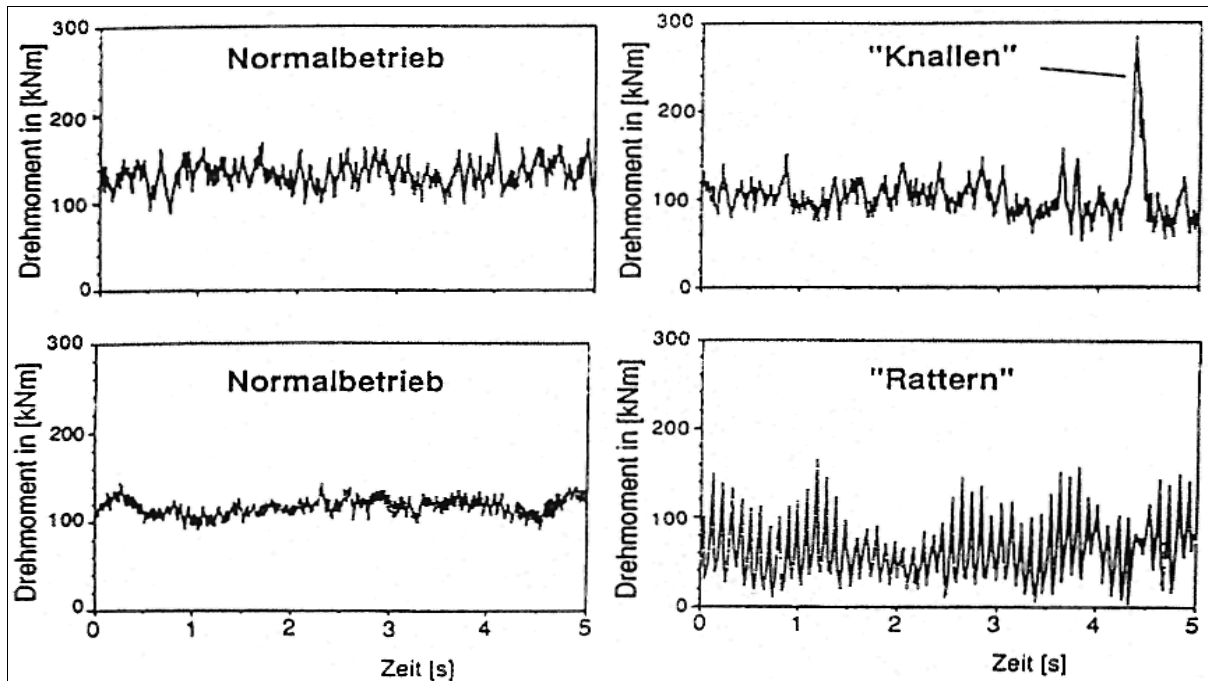


Abb.22: Verschiedene Betriebszustände einer Gutbett - Walzenmühle

gabegutes reagieren sie daher empfindlich. Sie wirken nicht als Mischer. Sollen mehrere Komponenten gleichzeitig vermahlen werden, so müssen diese vor der Aufgabe in die Maschine gut vermischt sein. Entmischungen im Aufgabebunker muß man möglichst vermeiden. Insbesondere ist es schädlich, wenn durch ungleichmäßige Zufuhr in der Nähe einer Walzenstirnseite überwiegend grobes, auf der anderen Seite hauptsächlich feines Gut aufgegeben wird [40]. Die Hochdruck-Gutbettzerkleinerung ist ein Zerkleinerungsverfahren für spröde Stoffe. Ein Anteil plastischen Materials, z. B. Ton, im Aufgabegut wirkt dann nicht störend, wenn das Gut soviel sprödes Material enthält, daß sich durch das gegenseitige Abstützen der Partikel noch ein "sprödes Bett" bilden kann. Das heißt, die plastischen Bestandteile dürfen nur einen Teil des Lückenvolumens ausfüllen [40]. Bei der Verdichtung des Materials werden Spannungen im Gutbett aufgebaut, die zur gewünschten Zerkleinerung führen. Das Material verläßt die Mühle schließlich agglomeriert in Form von Schülpen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines nachgeschalteten Desagglomerators, um das Fertiggut aufzuschließen. Die dazu erforderliche Energie verschlechtert die sehr gute energetische Bilanz von Mahlanlagen mit Gutbett-Walzenmühlen nur unwesentlich.

4.2 Derzeitiger Erkenntnisstand zum Betriebsverhalten

Im folgenden soll ein umfassender Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand vom Zerkleinerungs- und Verschleißverhalten der Gutbett-Walzenmühle, insbesondere beim Mahlen harter und mittelharter Materialien in Abhängigkeit der technologischen Parameter Durchsatz und Preßdruck, sowie dem Zerkleinerungsgut und Zerkleinerungsverhältnis gegeben werden. Hierzu muß vorab angemerkt werden, daß es diesbezüglich keine allgemeingültigen Aussagen gibt. Alle Veröffentlichungen, Forschungsberichte etc. beziehen sich ausdrücklich nur auf die dort untersuchten Materialien (hauptsächlich Zementklinker und -rohmaterial sowie Kalkstein) unter genau definierten Versuchsbedingungen. Über die Laborversuche hinaus gibt es jedoch bereits umfangreiche Betriebserfahrungen.

4.2.1 Zerkleinerungsverhalten

Bereits vor dem Einsatz der ersten Gutbett-Walzenmühlen wurden in Karlsruhe und an der TU Clausthal Untersuchungen zur Zerkleinerung im Gutbett durchgeführt. Zuvor wurde nachgewiesen, daß die Einzelkornzerkleinerung die energetisch günstigste Form der Zerkleinerung ist. Für die Erzeugung von Massenprodukten mit hoher Feinheit ist diese Erkenntnis jedoch nutzlos. Daraufhin wurde die Zerkleinerung im Gutbett untersucht, und bei Drücken von 50 MPa bis 500 MPa ergaben sich Feingutmengen, die eine technische Nutzung der Gutbettzerkleinerung sinnvoll erscheinen ließen [41].

Die Hochdruck-Gutbettzerkleinerung unterscheidet sich in einigen Punkten grundsätzlich von anderen Zerkleinerungsverfahren. Nach einmaligem Durchgang durch die Mühle weist das Produkt eine ungewöhnliche, sehr breite Korngrößenverteilung auf. Es wird ein verhältnismäßig großer Anteil Feinstkorn im Bereich kleiner 32 µm gebildet (je nach Material bis zu 20 %). Ein Teil des Aufgabegutes wird, da eingebettet in feines Material, gar nicht zerkleinert. Die größten Körner im Mahlprodukt entsprechen der Betriebsspaltweite, sofern das Aufgabegut Körner enthielt, die größer bzw. gleich der Spaltweite waren. Ein sehr erheblicher Teil der Partikel des Produktes weist nach der Hochdruckbehandlung feinste Risse auf. Diese bewirken, daß eine evtl. nachgeschaltete konventionel-

le Mühle das Gut mit weit geringerem Energieaufwand und mit größerer Durchsatzleistung auf Endfeinheit mahlen kann. Die erzeugten Mikrorisse können bei der Nachbehandlung einiger Stoffe noch weitere Vorteile bieten, so z. B. eine höhere Ausbeute bei der Goldlaugung o. ä.

Die Betriebsspaltweite s ist eine resultierende Größe und hängt vor allem von den Materialeigenschaften des Gutes und seiner Korngrößenverteilung sowie vom Walzendurchmesser D ab. Obwohl es sich nicht um einen Festsplatt handelt, arbeiten die Mühlen meist ohne größere Schwankungen hinsichtlich der Spaltweite. Voraussetzung ist, daß einige Grenzwerte insbesondere für den Fall beachtet werden, daß das maximale Aufgabekorn d_{\max} größer als die Spaltweite ist. Diese sind:

- ! Der Anteil des groben Aufgabegutes ($d > s$) sollte 20 % nicht übersteigen.
- ! Das Verhältnis $d_{\max} : s$ sollte kleiner 3:1 sein.

Das Verhältnis $D : d_{\max}$ sollte größer als 30 bis 40 sein, sonst werden die Aufgabekörner nicht mehr eingezogen [42].

Bei Untersuchungen zur Modellierung der Zerkleinerung in Gutbett-Walzenmühlen von Schmitz, Th. [41] wurden auch die Zusammenhänge zwischen dem erzielten Zerkleinerungserfolg und den Korngrößenverteilungen der eingesetzten Schüttungen bei verschiedenen Druckniveaus betrachtet. Im Unterschied zu vorherigen Untersuchungen wurden im Aufgabegut gewisse Mengen Feingut zugelassen, wie sie in der Praxis selbstverständlich sind. Vorversuche zeigten, daß mit einem Übergang von einer nahezu monodispersen Körnung zu einer dicht gepackten Aufgabekörnung starke Änderungen in der Größe der erzeugten Oberfläche und der eingeleiteten Energie verbunden sind. Daher arbeitete Schmitz [41] mit Mischungen der Ausgangskomponenten (Klinker, Schülpen, Griese), die den von Andreasen [43] angegebenen

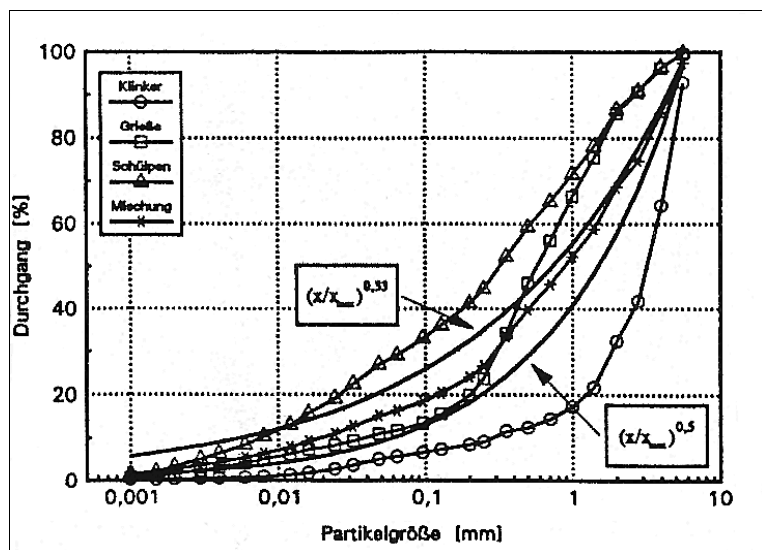


Abb.23: Grenzlinien der Korngrößenverteilung nach Andreasen

Verteilungen für eine möglichst dichte Packung sehr nahe kommen.

Andreasen zufolge muß die Korngrößenverteilung hierfür zwischen zwei Grenzlinien liegen (Abb.23):

$$g1(d)=(x/x_{\max})^{0.5}$$

und

$$g2(d)=(x/x_{\max})^{0.33}$$

mit x : Partikelgröße

und x_{\max} : maximale Partikelgröße

Allgemein läßt sich als Ergebnis dieser Untersuchungen sagen, daß die Unterschiede in der Lage der Verteilungen der Mahlprodukte um so kleiner werden, je feiner das Aufgabematerial ist. Bei hohem Druck (250 MPa) erscheinen die Verteilungen aller Ausgangskörnungen eines Materials ähnlich. Zwei Korngrößenverteilungen heißen ähnlich, wenn ihre Verteilungen in der normierten Darstellung aufeinanderfallen, mit anderen Worten, wenn sich eine durch Parallelverschiebung aus der anderen herleiten läßt. Um eine Ähnlichkeit von Korngrößenverteilungen nachweisen zu können, wird der Partikeldurchmesser normiert, d. h. daß die Partikeldurchmesser einer Kornklasse auf einen charakteristischen Partikeldurchmesser bezogen werden. Da sich im Bereich der Zementindustrie die Auftragung von Korngrößenverteilungen im RRSB-Netz als günstig erwiesen hat, wird der Lageparameter x' zur Normierung herangezogen. Eine Normierung mittels des Lageparameters x' bedeutet eine Parallelverschiebung der Kurven entlang der logarithmisch geteilten Abszisse in der Art, daß der Schnittpunkt mit der Geraden bei 36,8 % Rückstand für alle Kurven auf den normierten Partikeldurchmesser $x/x' = 1$ fällt. Die Gestalt der Verteilungen ändert sich durch die Normierung nicht [44]. Aus den Ergebnissen geht weiterhin hervor, daß die normierte Korngrößenverteilung bei einem entsprechend hohen Druck einer Grenzkornverteilung, der spezifischen Korngrößenverteilung, entgegen strebt. Diese ist nicht von der Ausgangskörnung, sondern nur vom Material und der maximalen Partikelgröße abhängig. Weicht die normierte Korngrößenverteilung der Ausgangsschüttung stark von der spezifischen Korngrößenverteilung ab, so wurde festgestellt, daß bereits geringe Drücke eine relativ große Verschiebung in Richtung spezifischer Korngrößenverteilung bewirkten. Vornehmlich in den unterrepräsentierten Klassen findet ein starker Zuwachs statt.

Die eingeleitete Energie steigt mit zunehmender normierter Verdichtung progressiv an (Abb. 24). Die normierte Verdichtung ist das Verhältnis des durch die Pressung erzielten Dichtezuwachses zum maximal möglichen Dichtezuwachs.

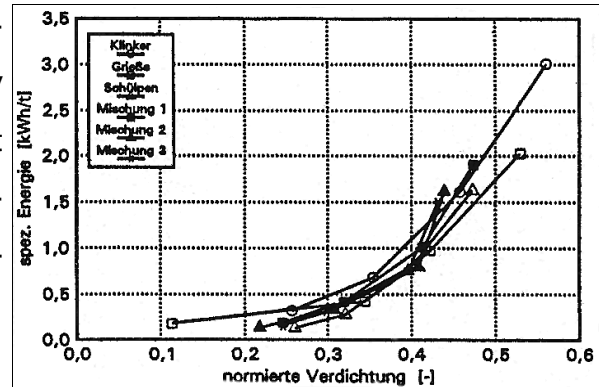


Abb.24: Eingeleitete spezifische Energie in Abhängigkeit der normierten Verdichtung

$$\begin{aligned} \text{Verdichtung:} \quad \eta &= \frac{\rho_f}{\rho_0} \\ \text{Normierte Verdichtung:} \quad \Theta &= \frac{(\rho \text{ \& } \rho_0)}{(\rho_s \text{ \& } \rho_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

- mit: η ... Verdichtung
 Θ ... normierte Verdichtung
 ρ ... Dichte
 ρ_0 ... Ausgangsschüttdichte
 ρ_f ... Enddichte
 ρ_s ... Reindichte [41]

Die Energieausnutzung veränderte sich bei allen untersuchten Schüttungen mit steigendem Druck im Gutbett. Mit wachsendem Druck erhöht sich die eingeleitete Energie, die Oberflächenerzeugung steigt aber nicht im gleichen Maße. Es ist ersichtlich, daß ein allzu hohes Druckniveau, d. h. spezifischer Arbeitsbedarf, nicht mehr den gewünschten Feinheitszuwachs bringt, im Gegenteil nur noch Energie "absorbiert". Dieses hohe Druckniveau wird z. B. in Brikettpressen realisiert. Gutbett-Walzenmühlen arbeiten dagegen in dem Bereich, wo die Feinheitszunahme proportional der Steigerung der spezifischen Energie ist [36].

Es wird deutlich, daß sich die Energieausnutzung einer Mahlung durch Zusatz von feinerem Material (hier von Griesen und/oder Schülpen zu Klinker) signifikant steigern läßt. Trägt man die Energieausnutzung über dem Quotienten von Schülpendichte und Schüttdichte der Ausgangskörnung auf (Abb. 25), so wird erkennbar, daß die Energieausnut-

zung mit größer werdendem Quotienten abnimmt.

Mit steigendem Druck erhöht sich die Schülpendichte und somit auch der Quotient aus Schülpen- und Schüttdichte; die Energieausnutzung wird schlechter. Ein kleinerer Quotient ist aber auch durch Maximierung der Schüttdichte, beispielsweise durch Zumischen anderer Komponenten bzw. Kornklassen, zu erreichen. Das heißt, das Lückenvolumen bzw. die Porosität wird minimiert. Die Energieausnutzung verbessert sich demzufolge mit Zunahme der Packungsdichte der Schüttung und mit Abnahme des Druckes [44].

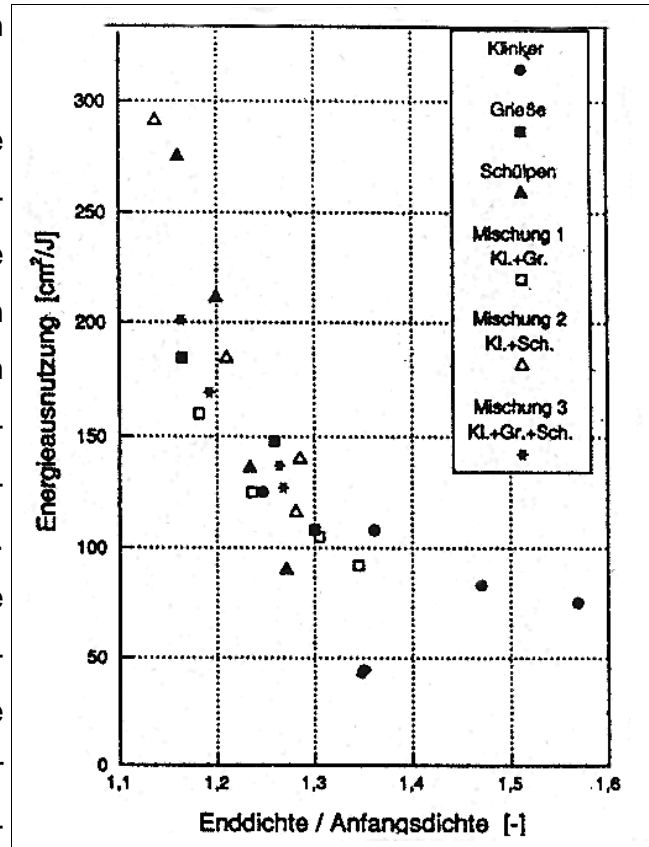


Abb.25: Energieausnutzung über dem Verhältnis von Enddichte zur Anfangsdichte

Die erzeugte spezifische Oberfläche

nimmt mit steigendem Druck zu, wobei der Kurvenverlauf jedoch degressiv ist und einem Grenzwert entgegen strebt. Das ist insofern plausibel, da die erzeugte Oberfläche, auch bei einer theoretisch unendlich großen zugeführten Energiemenge, nicht unendlich groß werden kann.

Der Oberflächenzuwachs, der durch die Einleitung einer bestimmten Energiemenge erreicht werden kann, ist wesentlich vom Korngrößenaufbau des Materials abhängig. Er fällt um so geringer aus, je feiner das Ausgangsmaterial vorliegt. Darüber hinaus konnte Schmitz, Th. in seinen Untersuchungen [44, 41] keine eindeutige Zuordnung von eingeleiteter Energie und Feinheitszuwachs finden. Die berechnete spezifische Oberfläche anhand der Korngrößenverteilung erscheint als das am besten geeignete Maß zur Beschreibung des Oberflächenzuwachses.

Umgekehrt ist der Zusammenhang zwischen Oberflächenzuwachs und Korngrößenaufbau jedoch, wenn das maximale Aufgabekorn größer als der Betriebsspalt der Mühle ist. Bei Aufgabekörnungen, die 2 bis 2,5 mal größer als die Schülpendicke sind, beträgt die

erzeugte Oberfläche nur etwa die Hälfte des Wertes von Körnungen, deren maximaler Korndurchmesser gleich der Schülpenstärke ist [36]. Die Hochdruck-Gutbettzerkleinerung ist mehr als andere Brech- und Mahlverfahren "selektiv" in dem Sinn, daß einige Komponenten des Aufgabegutes besonders intensiv, andere besonders wenig beansprucht werden. Außerdem gibt es Hinweise darauf, daß die neu gebildeten Oberflächen mehr als bei anderen Verfahren den Grenzflächen zwischen verschiedenen kristallinen Bestandteilen folgen. Die Kimberlit-Zerkleinerung ist ein gutes Beispiel für diese Effekte. Die Selektivität kann sich aber auch nachteilig auswirken, beispielsweise durch Anreicherung der härteren Komponente im Sichtergrobgut mit der Folge höheren Verschleißes im gesamten Kreislaufsystem. Das Betriebsverhalten der Gutbett-Walzenmühle ist nahezu unabhängig von Schwankungen in Qualität und Zusammensetzung des Aufgabegutes, d. h. sie kann durch Änderungen des Mahldruckes bzw. der Walzengeschwindigkeit ohne Probleme den veränderten Bedingungen angepaßt werden [42].

4.2.2 Einzugsverhalten

Das Einzugsverhalten der Mühle hängt vom Anpreßdruck der Schüttung und den Reibungsverhältnissen zwischen Mahlgut und Walzenoberfläche ab. Versuche an einer Laborwalzenmühle

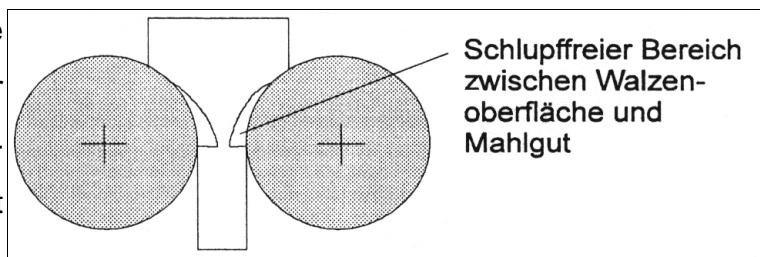


Abb.26: Schematische Darstellung des schlupffreien Bereiches

le mit einem gläsernen Aufgabeschacht zeigten, daß ein schlupffreier Bereich zwischen Walzenoberfläche und Mahlgut existiert (Abb. 26), der in Richtung des engsten Spaltes sichelförmig anwächst. Nachdem eine erste Schicht von Partikeln schlupffrei von der Walze mitgenommen wird, sind die Einzugsbedingungen nicht mehr von den Reibungsverhältnissen zwischen Walzenoberfläche und Schüttgut abhängig. Die Relativbewegung findet nun nicht mehr an der Grenzfläche zwischen Gut und Walze, sondern innerhalb des Schüttgutes statt. Damit ist für die weitere Entwicklung des Einzugsverhaltens die innere Reibung des Materials maßgeblich. Die innere Reibung ist wiederum von der Art des Aufgabegutes, seiner Korngrößenverteilung und seinem Gehalt an Oberflächenfeuchte

abhängig.

Allgemein läßt sich feststellen, daß feinkörniges Gut dickere Schülpen produziert und demnach bessere Einzugsbedingungen aufweist als gröberes Aufgabegut [36].

Sichere Methoden, das Einzugsverhalten im Kleinversuch vorauszubestimmen und damit die Leistung von Betriebsmaschinen vorherzusagen, gab es bis Anfang der 90er Jahre laut Kellerwessel [40] noch nicht. Einen Anhaltspunkt kann das Bestimmen des Schüttwinkels (als Maß für die innere Reibung) und des Abrutschwinkels auf einer Fläche (als Maß für die äußere Reibung) liefern, welche die gleichen Oberflächeneigenschaften wie die später zu verwendenden Mahlwalzen besitzt [45].

Sehr häufig wird auch der spezifische Durchsatz zur Beurteilung des Einzugsverhaltens herangezogen. Er errechnet sich aus

$$m = \frac{M}{D \cdot B \cdot u} \quad (2)$$

mit

<i>m</i> ... spezifischer Durchsatz einer Gutbett-Walzenmühle
<i>M</i> ... Durchsatz
<i>D</i> ... Walzendurchmesser
<i>B</i> ... Walzenbreite
<i>u</i> ... Walzenumfangsgeschwindigkeit

[36]

Extrem gut rieselfähige, feinkörnige und trockene Schüttgüter ziehen manchmal schlecht ein, bzw. rieseln ohne Druckaufbau durch den Mahlpalt hindurch. Mischt man etwas Wasser hinzu, so bessern sich die Einzugsverhältnisse [40].

Sowohl im Labor, als auch in Technikumsversuchen und im praktischen Betrieb wurde der Nachweis geführt, daß die Rollenpressen grundsätzlich geeignet sind, auch sehr feuchtes Gut zu verarbeiten. Laut Kellerwessel [46] ist dies bis zu einem Wassergehalt von 15 Vol.-% möglich. Zwar beeinträchtigt zu hohe Oberflächenfeuchte den Einzug des Gutes (etwas Feuchte fördert dagegen in manchen Fällen sogar den Prozeß), es gibt jedoch betriebsbewährte Maßnahmen, dies zu kompensieren [47].

In bestimmten Grenzsituationen kann es während des Betriebes zu mehr oder weniger starken Vibrationen der Gutbett-Walzenmühle kommen. Diese Vibrationen werden durch

die entweichende Luft aus der Kompressionszone verursacht. Dies geschieht meist nur bei Aufgabeschüttungen mit sehr hohem Feinstanteil, hier jedoch bereits bei Umfangsgeschwindigkeiten von 0,4 - 0,5 m/s. Dem Material entgegenströmende Luft erzeugt eine Kraft, die der Anpreßkraft, mit der das Schüttgut auf den Walzen aufliegt, entgegenwirkt. In Abhängigkeit von den vorliegenden Reibungsverhältnissen kann es dadurch zu Störungen im Einzugsverhalten der Mühle kommen. Diese Störung ist um so größer, je schneller die Luft strömt und je größer der Strömungswiderstand der Schüttgutpackung ist. Die Anströmgeschwindigkeit ist abhängig vom Volumenstrom der ausgetriebenen Luft, wobei der Volumenstrom vom Lückengrad der Schüttung und von der Walzendrehzahl bestimmt wird. Bei gleichem Lückenvolumen ist der Strömungswiderstand um so kleiner, je größer der durchschnittliche Porenquerschnitt der Schüttung ist [44]. Daraus ergibt sich, daß bei Material mit hohem Strömungswiderstand eine kritische Umfangsgeschwindigkeit innerhalb des Bereiches von in der Praxis üblichen Umfangsgeschwindigkeiten existiert, bei welcher der Betrieb durch o. g. Vibrationen erheblich gestört wird, bzw. zusammenbricht. Mögliche Gegenmaßnahmen gegen diesen instabilen Betriebszustand sind :

- ! Rückführen eines Teils der gepreßten Schülpen, gegebenenfalls der weniger gut gepreßten Randzonen, dadurch geringerer "Luftgehalt" im Aufgabegut, größere Kanäle im Schüttgut, durch welche die Luft nach oben entweichen kann, geringere Gefahr des Fluidisierens wegen der größeren mittleren Masse der Partikel (Mit steigender zurückgeführter Schülpenmenge sinkt zwar die Effizienz der Zerkleinerung, doch das nimmt man oft in Kauf, da die Schülpenrezirkulation sehr preiswert zu realisieren ist und zudem regeltechnische Vorteile bietet [36].)
- ! Anordnung einer vertikalen, meist konischen Zuführungsschnecke im Aufgabeschacht (sog. Stopfschnecke) zur Vorentlüftung und Vorverdichtung
- ! schmale Walzen, die eine Entlüftung zur Seite gestatten (dann aber erhebliche Randeinflüsse) [40]

Schmitz empfiehlt für den Fall, daß es nicht möglich ist, die Aufgabegutfeinheit zu verringern, zwei Möglichkeiten zur Erzielung eines stabilen Betriebspunktes:

- ! Herabsetzen der Walzenumfangsgeschwindigkeit, womit sich die Geschwindigkeit der verdrängten Luft verringert und der Anpreßdruck der Schüttgutsäule auf den Walzen erhöht

! Erhöhung des Reibungswinkels zwischen Walzenoberfläche und Schüttgut, womit auch bei geringeren Anpreßdrücken ein stabiler Betriebspunkt zu erreichen ist [44]. KHD führte hierzu ebenfalls Versuche durch. Von besonderer Bedeutung ist demnach bei der Kreislaufmahlung von Zement die relativ grobe Korngrößenverteilung des Sichter-grobgutes. Bei der Mischung mit unzerkleinertem Klinker ergeben diese groben Griesse ein relativ ausgeglichenes Kornband, das sich am Walzenspalt gut einziehen und verdichten läßt. Somit wurden selbst bei bis zu 7 Umläufen keine instabilen Betriebszustände infolge Entlüftungsproblemen festgestellt [48].

4.2.3 Durchsatz

Mit Gutbett-Walzenmühlen lassen sich in Abhängigkeit von Walzenbreite und Walzen-durchmesser sowie des Aufgabematerials Durchsätze bis zu 350 t/h erreichen. Der Durchsatz wird von den Reibungskräften im Einzugsbereich der Mühle bestimmt, die wiederum von den dort auftretenden Gewicht-, den Strömungs- und den Zentrifugal-kräften abhängen. Darüber hinaus beeinflussen Schüttguteigenschaften wie z. B. innere und äußere Reibung sowie Formschluß und Impulsaustausch zwischen den Walzen und Partikeln bzw. Impulsaustausch innerhalb der Gutschüttung den Materialeinzug [35]. Wenn kein Schlupf auftritt, errechnet sich der Durchsatz einer Gutbett-Walzenmühle in t/h nach der Zahlenwertgleichung

$$M = B \cdot s \cdot u \cdot \rho_f \cdot 3600 \quad (4)$$

mit u als der Umfangsgeschwindigkeit in m/s, s als der Schülpendicke und B als der Schülpenbreite in m, sowie ρ_f als der Schülpendichte in t/m^3 , wobei die Schülpendichte sich aus der Reindichte des Aufgabegutes ρ und der Schichtdichte $(1-\varepsilon)$ berechnet [36, 49]:

$$\rho_f = \rho \cdot (1-\varepsilon) \quad (5)$$

Oft werden dimensionslose Kennzahlen eingeführt, so daß sich der Durchsatz mit

$$\frac{B}{D} = \lambda \quad \text{und} \quad \frac{s}{D} = \kappa \quad \text{wie folgt bestimmen läßt [49]:}$$

$$M = u \rho_f (1 - \varepsilon) D^2 \kappa \lambda \approx 3600 \quad (6)$$

Die Schülpendicke kann von der gemessenen Spaltweite infolge der Rückdehnung der Schülpen nach Verlassen der Kompressionszone etwas abweichen. Für die Berechnung muß deshalb die gemessene Schülpendicke und nicht die Spaltweite zugrunde gelegt werden, denn nur diese korreliert zu der nur außerhalb des Spaltes meßbaren Schülpendichte ρ_f . Unter sonst gleichen Verhältnissen sind die Schülpendicke und damit die Aufgaberate etwa proportional dem Walzendurchmesser.

Bisher übliche Arbeitsbereiche sind :

$$u = 0.9 - 1.8 \text{ m/s}$$

$$s = 8 - 30 \text{ mm}$$

B bis etwa 1.4 m

ρ_f etwa 80 % der Reindichte des Aufgabegutes.

In Gleichung (4) ist unterstellt, daß die Schülpe an der engsten Stelle des Spaltes keine Differenzgeschwindigkeit zu den Walzenoberflächen aufweist. Bei verschiedenen Aufgabematerialien scheint diese Voraussetzung nicht erfüllt zu sein. Es gibt Indizien für ein Voreilen der Schülpen, insbesondere wenn sehr große Verdichtungen über 0,85 erzwungen werden. Aus Gleichung (4) ergibt sich, daß sowohl Durchsatz als auch Leistung der Gutbett-Walzenmühle direkt proportional der Umfangsgeschwindigkeit sind, sofern alle anderen Bedingungen konstant bleiben. Oberhalb einer materialspezifischen Grenze steigt der Durchsatz jedoch nur noch degressiv mit der Umfangsgeschwindigkeit. Die Schülpendicke ändert sich bei steigender Umfangsgeschwindigkeit zunächst nur wenig. Erst von einer bestimmten Grenzggeschwindigkeit an nimmt die Schülpendicke rapide ab und der Prozeß der Gutbettzerkleinerung bricht zusammen, weil nicht mehr genug Aufgabegut für die Bildung eines Gutbettes eingezogen wird.

Neben den Materialeigenschaften, der Körnung, der Walzengeometrie und der Umfangsgeschwindigkeit haben auch Feuchtigkeit und Walzenprofil Einfluß auf den Durchsatz. Die Anpreßkraft und damit der im Gutbett herrschende Druck haben innerhalb des für

eine Gutbettzerkleinerung üblichen Bereiches nur einen geringen Einfluß auf die Durchsatzrate [40]. Dieser ist hauptsächlich vom Material, der Körnung und der Feuchte abhängig. Bei Quarz, Kalkstein oder Kupfererz ändert sich der Durchsatz nur unmerklich, wogegen bei Zementklinker oder Blei-Zink-Erz schwache Reduzierungen mit wachsender Mahlkraft beobachtet wurden. Eine stärkere Abnahme infolge zunehmender Mahlkraft zeigt sich bei feuchten Materialien [35].

4.2.4 Kräfte an den Walzen und Druckverteilung

Bevor ausführlich auf die Druckverteilung eingegangen wird, sollen die Kräfteverhältnisse im Walzenspalt kurz erläutert werden. Diese sind in Abb.27 schematisch dargestellt. Das Antriebsmoment T der beiden Walzen ergibt sich als Produkt der Mahlkraft F , des Walzendurchmessers D und dem Sinus des Kraftangriffswinkels ϕ .

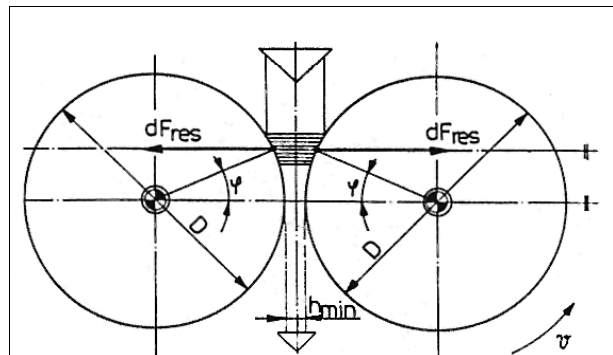


Abb.27: Kräfte im Walzenspalt

$$T_A = F \cdot D \cdot \sin \phi \quad (7)$$

Der Kraftangriffswinkel ist eine materialspezifische Größe, die aus Messungen zu ermitteln ist [48]. Nach Lubjuhn [35] ergibt sich der Kraftangriffswinkel β aus der spezifischen Mahlkraft F_{sp} und dem spezifischen Drehmoment T_{sp} (Abb.28). Die genannten Kraftangriffswinkel ϕ und β sind identisch.

$$\beta = \frac{T_{sp}}{F_{sp}} \quad (8)$$

$$F_{sp} = \frac{F}{D \cdot B} \quad (9)$$

$$T_{sp} = \frac{T_A}{D^2 \cdot B} \quad (10)$$

Stellt man Gleichung (10) nach T_A um und setzt für T_{sp} die umgestellte Gleichung (8) ein, erhält man für das Antriebsmoment:

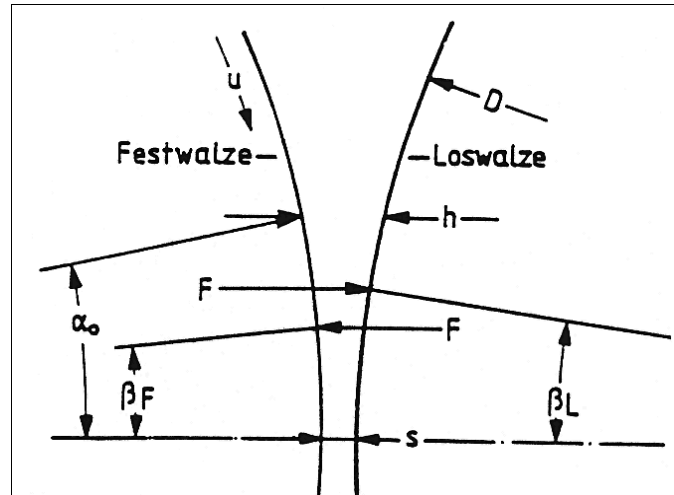


Abb.28: Kraftangriffswinkel β

$$T_A = \beta \cdot D^2 \cdot B \cdot F_{sp} \quad (11)$$

Hiermit kann nun die Antriebsleistung aus dem Produkt aus Antriebsmoment und Kreisfrequenz bestimmt werden. Mit Gleichung (11) und

$$\omega = \frac{2}{D} \cdot u \quad (12)$$

erhält man :

$$P = 2 \cdot \beta \cdot D \cdot B \cdot u \cdot F_{sp} \quad (13)$$

Aus Gleichung (4) und $\kappa = \frac{s}{D}$ ergibt sich :

$$V = \frac{M}{\rho_f} = s \cdot B \cdot u = \kappa \cdot D \cdot B \cdot u \quad (14)$$

Somit läßt sich Gleichung (13) wie folgt umschreiben [50]:

$$P = 2 \varrho \frac{V}{\kappa} \varrho F_{sp} \quad (15)$$

Nach Feige [37] hängen die Kräfte, die auf die Walzen ausgeübt werden, in Größe und Richtung vom zu beanspruchenden Stoff selbst, von der Einstellung und Beaufschlagung des Walzenspaltes sowie von der Geometrie und der Antriebsart der Mühle ab. Wie in Abbildung 28 dargestellt, werden von einem beliebigen Massenelement auf die Walzen folgende Kräfte übertragen:

$$dF_r = B \frac{D}{2} \rho(\phi) d\phi \quad (16)$$

$$dF_t = B \frac{D}{2} \rho(\phi) \mu(\phi) d\phi \quad (17)$$

mit $\mu(\phi) = \frac{dF_t}{dF_r}$

Die sich im Ergebnis dieses Beanspruchungszustandes ausbildende Druckverteilung enthält sozusagen die gesamte Beanspruchungsgeschichte.

Somit ist

$$\rho(\phi) = \rho[(1-\varepsilon)_e, \psi, L(D, d_k)] \quad (18)$$

wonach der Druckverlauf im Wesentlichen von der Schichtdichte $(1-\varepsilon)_e$ als Maß für die Spaltbeaufschlagung, vom Abbaugrad ψ als Maß für die Beanspruchungsintensität und dem Beanspruchungsweg L , welcher geometrisch durch Walzendurchmesser D und einen charakteristischen Korndurchmesser d_k festgelegt ist, abhängt. Letzterer berücksichtigt die Granulometrie der Körnerschicht und liegt zwischen mittlerem und maximalem Korndurchmesser.

In einer beliebigen Ebene des Beanspruchungsbereiches besteht folgender Zusammenhang zwischen spezifischem Druck und der mittleren Radialkraft.

Aus Gleichung (9) folgt:

$$F_r = B \frac{D}{2} \int_{\phi} p(\phi) d\phi \quad (19)$$

Der spezifische Druck kann, wenn die Radialkraft bekannt ist, nach

$$\bar{p} = \frac{F_r}{B L(D, d_k)} \quad (20)$$

und der maximale Druck nach

$$p_{max} = \frac{2 F_r}{B L(D, d_k)} \quad (21)$$

berechnet werden.

Für die Beanspruchungslänge gilt mit einigen Vereinfachungen:

$$L = \frac{1}{2 \sqrt{d_k (2D - d_k)}} \quad (22), [37]$$

Wie bereits in Abschnitt 3 angedeutet bilden sich im Walzenspalt typische Druckprofile heraus. Die Kurvenverläufe in den Abbildungen 20 (unten, oben) sind jedoch stark idealisiert, denn sowohl Mahlgut und Körnung als auch die Umfangsgeschwindigkeit beeinflussen den Druckverlauf.

Der Bereich zwischen den Mahlwalzen wird, wie bereits angesprochen, in drei Zonen eingeteilt, die Beschleunigungs-, die Kompressions- und die Rückdehnzone. Infolge der Verdichtung bzw. Entlastung entsteht im Material ein inhomogenes dreidimensionales Spannungsfeld, das unbekannt ist und auch nicht gemessen oder berechnet werden kann. Es läßt sich jedoch die lokale Kraftwirkung auf die Walzen messen und daraus der

mittlere Normaldruck und die mittlere Schubspannung auf die Meßfläche berechnen. Bei schlupffreiem Transport haben Schubspannungen an der Grenzfläche keinen Einfluß auf die Verdichtung und damit auch nicht auf den Zerkleinerungseffekt. Selbst bei geringem Schlupf, insbesondere wenn er im oberen Bereich der Kompressionszone auftritt, existiert nur ein geringer Einfluß. So kann angenommen werden, daß die Zerkleinerung hauptsächlich durch den Normaldruck bestimmt wird. Der Normaldruck ist eine Funktion des Winkels α und steigt von α_0 aus mit abnehmendem Winkel an, erreicht kurz oberhalb oder in der Wellenebene ein Maximum und fällt dahinter steil ab. Das Verschleißbild der Mahlwalzen und der zum Rand hin abnehmende Zerkleinerungseffekt lassen darüber hinaus auch einen Druckabfall in axialer Richtung erwarten [35].

Intensive Untersuchungen zur Druckverteilung im Walzenspalt führte Lubjuhn, U. [35] mit verschiedenen Quarz- und Kalksteinkörnungen bei variierenden Umfangsgeschwindigkeiten durch.

Dazu baute er Drucksensoren bei $l = 0, 19$ und 38 mm entsprechend

$$\lambda^* = 0, 0.19 \text{ und } 0.38 \text{ ein (siehe Abb.29).}$$

$$\lambda^* = l / L \quad \text{mit } L = 100 \text{ mm}$$

Die Abb. 30 und 31 zeigen repräsentative Beispiele für die Abhängigkeit des peripheren Druckverlaufes von der spezifischen Mahlkraft, vom Material, von der Körnung und der Umfangsgeschwindigkeit.

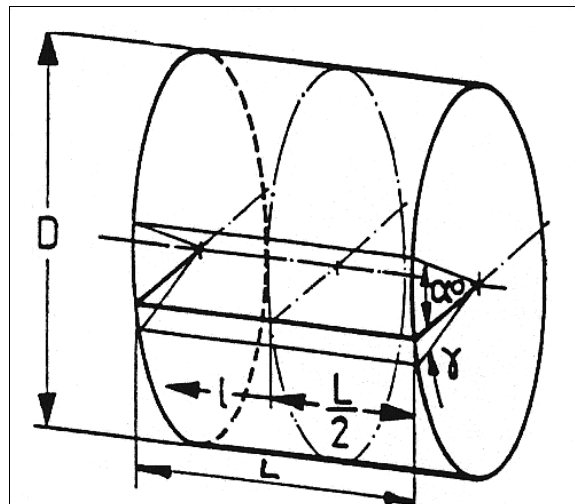


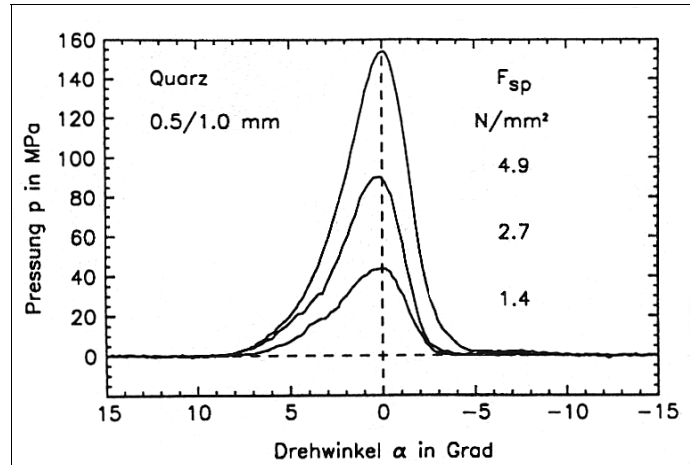
Abb.29: Geometrische Größen der Walze

Die körnige Struktur des Gutbettes bedingt, daß sich die Kurven nicht glatt darstellen und die Ergebnisse statistische Schwankungen aufweisen.

Die Ausprägung beider Effekte verstärkt sich mit zunehmender Partikelgröße und abnehmender Mahlkraft. Die Energieabsorbtion wird durch Breite und Form der peripheren Druckverteilung bestimmt. Die Breite ergibt sich aus dem Kompressions- und Rückdehnwinkel. Ersterer hängt von innerer und äußerer Reibung des Materials, vom Verhältnis der maximalen Aufgabekorngröße zum Walzendurchmesser und vom Walzenprofil, zweiterer vom elastischen Verformungsverhalten des Materials und von Umordnungsvorgängen in

der Rückdehnzone ab.

Die Form der Druckverteilung wird vom Verformungswiderstand der Gut- schüttung beeinflusst, der vom Materi- al, aber auch vom Korngrößenaufbau sowie von der Feuchte und Be- anspruchungsgeschwindigkeit ab- hängt.



Das Druckmaximum liegt bei Metall- **Abb.30:** Druckverlauf in Abhängigkeit der spezifischen Mahlkraft

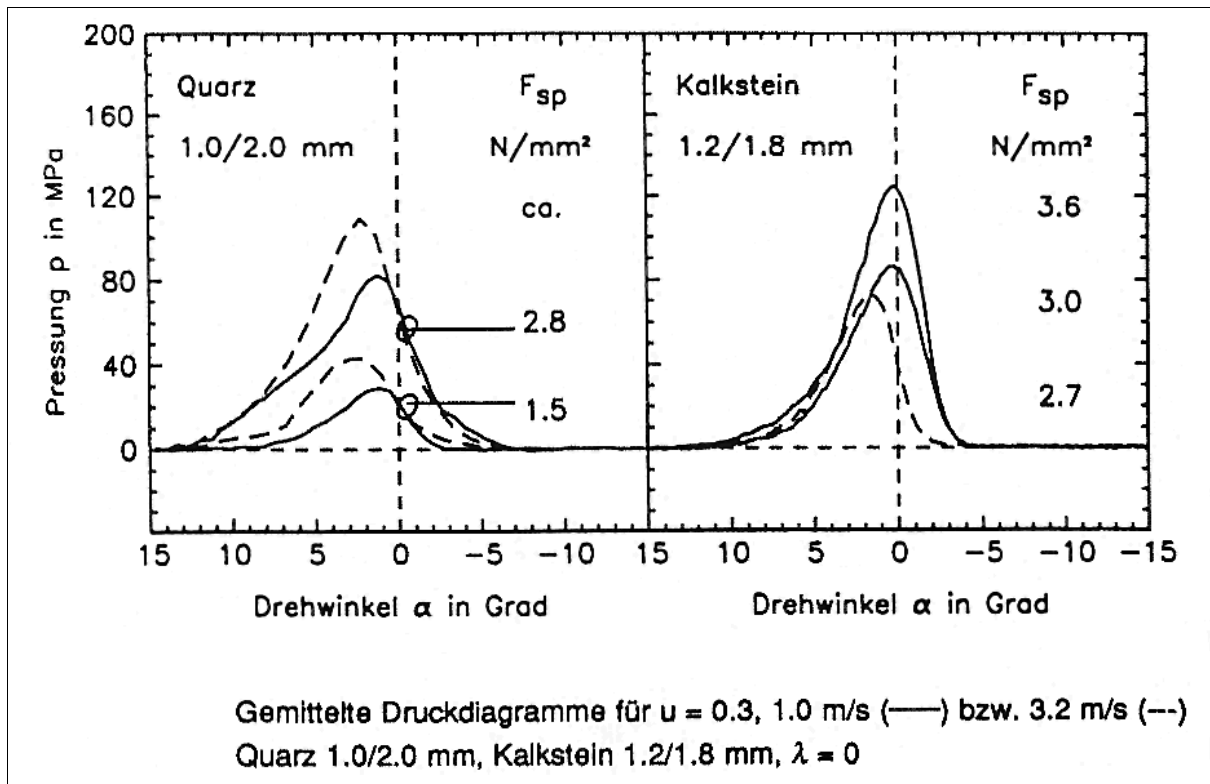


Abb.31: Druckverläufe bei verschiedenen Materialien, Umfangsgeschwindigkeiten und Körnungen walzen bekanntermaßen vor der Wellenebene. Deshalb wird dieses auch häufig von Brikettierwalzen und Gutbett-Walzenmühlen angenommen. Bei Lubjuhn zeigten jedoch alle gemittelten Druckdiagramme der feineren Fraktionen bei Umfangsgeschwindigkeiten von $u = 0,3$ und $u = 1,1$ m/s ein Druckmaximum zwischen $\alpha = 0$ und 1 Grad. Daraus kann geschlossen werden, daß bei diesen Betriebsbedingungen, die durch Gutbetteinzug und eine Verdichtung auf einen Wert $\delta_s = 0,9$ charakterisiert werden, das Druckmaximum in der Wellenebene oder höchstens geringfügig darüber auftritt (δ_sFeststoffvolumenanteil

im engsten Spalt). Bei größeren Fraktionen zeigten sich unsystematische Verschiebungen des Maximums, die wahrscheinlich durch statistische Unsicherheiten bedingt sind. Bei Versuchen mit der großen Umfangsgeschwindigkeit von $u = 3,2 \text{ m/s}$ war die Tendenz zu einer Verschiebung des Maximums zu $\alpha = 2^\circ$ erkennbar. Erklärbar ist dies mit einer Verarmung der Materialzufuhr in der Kompressionszone bei gleichzeitig örtlich inhomogenem Materialfluß. Dies führt zu lokalen Überpressungen auf $\delta_s > 0,9$. In diesen Bereichen muß, wie bei Metallwalzen, das Material kurz oberhalb der Wellenebene beginnen vorzueilen, wodurch sich das Druckmaximum nach oben verschiebt [35].

Von KHD durchgeführte Untersuchungen führten teilweise zu anderen Ergebnissen. So ergaben direkte Messungen des Druckverlaufes im Walzenspalt mittels eines Druckaufnehmers, daß das Druckmaximum deutlich vor dem engsten Spalt, also vor der Wellenebene liegt. Das Versuchsprogramm, welches an einer Rollenpresse mit 800 mm Rollendurchmesser und 250 mm Rollenbreite durchgeführt wurde, umfaßte verschiedene Materialien und Drücke. Die maximal aufgetretenen lokalen Drücke betragen bei Klinker 350 N/mm^2 bei einer Nennbelastung von knapp 100 N/mm^2 [39]. Somit wird deutlich, daß der Druckverlauf teilweise sehr unterschiedlich sein kann, wobei Materialeigenschaften des Aufgabegutes sowie Maschinendaten und die Walzengeometrie einen entscheidenden Einfluß auf den Druckverlauf haben dürften.

Wie bereits in Abb. 20 (unten) zu erkennen war, fällt der Mahldruck in axialer Richtung von der Walzenmitte zu den Rändern hin stark ab. Lubjuhn führte auch hierzu Messungen mit verschiedenen Quarz- und Kalksteinfraktionen durch und kam zu folgenden Schlußfolgerungen:

- ! Die Form der Druckverteilung ist abhängig vom Material und im untersuchten Bereich auch von der Partikelgröße.
- ! Der Druckabfall zum Rand hin wird mit zunehmender Mahlkraft steiler.
- ! Am äußeren Walzenrand verringert sich die Pressung bis zu 75% gegenüber dem Wert in der Walzenmitte.

Die Abnahme des Druckes kann durch zwei Vorgänge verursacht werden:

- ! Ein Teil des Materials verläßt die Beanspruchungszone durch die Zwischenräume zwischen den Schachtseitenwänden und den Walzen.
- ! Der Materialtransport in die Kompressionszone hinein wird in den Randbereichen

von den feststehenden Seitenwänden behindert.

Beide Phänomene führen dazu, daß der lokale Materialfluß durch den engsten Spaltquerschnitt nach außen hin abnimmt. Die Spaltweite ist jedoch (wenn nicht aus verschleißtechnischen Gründen konstruktiv anders vorgesehen) längs der Walze konstant, woraus eine nach außen abnehmende Verdichtung und ein entsprechend kleinerer Druckaufbau resultieren. Welcher der genannten Effekte überwiegt, hängt von den Materialeigenschaften und der Körnung des Aufgabegutes ab [35].

4.3 Derzeitiger Erkenntnisstand zum Verschleißverhalten

Für die Bewertung und anschließende Beeinflussung des Verschleißvorganges ist das Verständnis des tribologischen Systems in der Gutbett - Walzenmühle von hoher Bedeutung. Deshalb sollen in den folgenden Abschnitten zunächst die verschiedenen auftretenden Verschleißmechanismen und deren Auswirkungen auf die Walzenoberflächen und anschließend entsprechende Verschleißschutzmaßnahmen besprochen werden.

4.3.1 Verschleißmechanismen

Bei der Gutbettzerkleinerung werden die meisten Teilchen autogen durch andere Materiateilchen zerkleinert. Deshalb sind hohe Verschleißraten an den Mahlwalzen nicht zu erwarten.

Neben der hohen Pressung zwischen Gutbett und Walzen charakterisiert eine Relativbewegung zwischen Partikeln und Walzenoberfläche infolge Bruch und Gleiten die mechanischen Vorgänge. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Tribo-Systems -Werkstoff und Mahlgut- sind folgende Schädigungserscheinungen zu beobachten :

- ! Verschleiß (Abrasion)
- ! Ermüdung (Mikro-Ermüdung)
- ! Korrosion

Diese Mechanismen sind stets untereinander verbunden, aber in den meisten Fällen überwiegt die Abrasion, und sie ist die Hauptursache für den Materialverlust. Vergleichende raster-elektronenmikroskopische Untersuchungen (REM) von Oberflächenabdrücken

sowohl an Test- als auch an Industriemühlen haben die Abrasion sowie die Ermüdung als beherrschende Abnutzungsarten bestätigt.

Sowohl bei der Abrasion als auch bei der Mikro-Ermüdung ist die "Hoch-Tieflagen-Charakteristik" der entscheidende Faktor. Gemäß dieser Charakteristik beruht der Verschleißwiderstand einer Legierung auf dem Verhältnis ihrer Ritzhärte zu der des Gegenkörpers. Ist der Gegenkörper, hier die Mahlgutpartikel, härter als die Metall-Legierung, so dringt er in deren Oberfläche ein und hinterläßt Rillen und Eindrücke. Deren Größe ist begrenzt durch die Größe der harten Partikel.

Beim Fehlen härterer Materialien ist Mikro-Ermüdung der bestimmende Mechanismus. Das Ausmaß der Ermüdung hängt vom Eintrag an Spannungsenergie ab. Diese resultiert aus der Belastung pro Flächeneinheit und der Zahl der Lastzyklen. Nach einer gewissen Inkubationszeit treten Anrisse und Rißausbreitung auf. Diese führen bei duktilen Werkstoffen zur Ablösung von schuppenförmigen Partikeln und bei spröden Werkstoffen zu Mikro-Zerrüttung von Oberflächenbereichen.

Bei Anwesenheit von Feuchtigkeit oder aggressiven Stoffen kann laut Knobloch [51] Korrosion zum bestimmenden Verschleißmechanismus werden. Beim Mahlprozeß kann die Walzentemperatur bis auf 100 °C ansteigen, was die tribochemische Reaktivität weiter steigert. Der Verschleißeffekt der Korrosion kann demnach gemindert werden durch die Wahl einer angemessenen Legierung mit mindestens 12 % Chrom und etwas Molybdän. Das ist besonders bei Mahlgütern mit geringem Verschleiß im trockenen Zustand wichtig, da hier die Verschleißrate infolge Feuchte um ein Mehrfaches ansteigt. Bei sehr stark abrasiven Mahlgütern dagegen liegt die relative Zunahme meist unter 100 %. Das ergaben Untersuchungen an einer Polycom-Testmühle [51]. Die Mahlgutfeuchte erwies sich hierbei von mehreren untersuchten Parametern als der mit dem stärksten Einfluß. Dies liegt offenbar an der Korrosionswirkung, die den Trockenverschleiß -Abrasion und/ oder Ermüdung- überlagert und um so stärker ins Gewicht fällt, je niedriger der trockene Verschleiß ist.

Der Aussage, daß die Korrosion infolge feuchten Aufgabegutes als stärkster Schädigungsfaktor auftritt, ist entgegenzuhalten, daß der Verschleiß bei feuchtem Mahlgut sofort sprunghaft steigt, was aufgrund der kurzen Reaktionszeit nicht auf tribochemische Vorgänge zurückgeführt werden kann. Untersuchungen zur Abrasivität von Schüttgütern

bestätigen hingegen, daß diese mit steigendem Wassergehalt bis zum Erreichen eines materialspezifischen Maximums ebenfalls ansteigt. Demzufolge verstärkt erhöhte Mahlgutfeuchte den Vorgang der Abrasion, und Korrosion gewinnt erst nach einer größeren Zeitspanne an Bedeutung [52].

Wegen des nach bisherigen Erkenntnissen relativ hohen Anteils der Abrasion ist es wünschenswert, für die Walzen eine Metalllegierung auszuwählen, die härter ist als das Mahlgut. Solche Legierungen sind verfügbar für Kalkstein, Zementklinker, Hüttensand sowie Mahlgüter, die Feldspat enthalten. Ihre Reißbeständigkeit reicht aus, exzessiven Abrasions- und Ermüdungsverschleiß zu verhindern.

Die Härte von Steinen, die im wesentlichen aus Quarz bestehen, übersteigt indessen die Härte aller zur Zeit verfügbaren Legierungen. Die Verbesserung des Gesamtverschleißwiderstandes erfordert deshalb einen Kompromiß. Die Bruchfestigkeit muß von einer Matrix beigetragen werden, die weniger hart ist als Quarz. Der Widerstand gegen Abrasion wird gesteigert durch das Einbetten harter Phasen, wie Karbide und Boride, die härter sind als Quarz. Die Härte der eingebetteten Phase sollte deutlich über der Härte der abrasiven Partikel liegen, keinen zu hohen Volumenanteil aufweisen (< 50 %) und gleichmäßig verteilt sein [51].

Die Verschleißraten schwanken naturgemäß je nach Art des Mahlgutes, Walzenoberflächen-Werkstoff und Mahldruck sehr erheblich. Einen allgemeinen Überblick über die in der Literatur angegebenen Verschleißwerte soll die folgende Tabelle geben:

Quelle/Literaturstelle	Mahlgut	Verschleißrate [g/t]	Bemerkungen
Fa. Köppern	Zementklinker	0,1 - 0,45	mit aufgeschweißten Walzenoberflächen
	Kalkstein	0,1 - 0,5	
E. Galanulis [53]	Kalkstein	bis 1	Nihard-Bandagen
N. Patzelt, T. Tiggesbäumker [38]	Zementklinker	0,1	Oberfläche aufgeschweißt
	Zementrohmaterial sehr abrasive Güter	bis 1 mehr als 10	
	Zementklinker	0,1 - 0,2	Segmentpanzerung
KHD-Symposium 92, [54]	Kimberlit	2,3	Versuchsrollenpresse mit Segmentpanzerung
M.J.G. Battersby [55]	Zementklinker	ca. 0,25	Vormahlung
	Kimberlit-Erz	7 - 10	

Quelle/Literaturstelle	Mahlgut	Verschleißrate [g/t]	Bemerkungen
Brachthäuser/Wollner [56]	Kalkstein	0,05	Oberfläche aufgeschweißt
	Klinker/Hüttensand	0,16	
Oberheuser [57]	Hochofenschlacke	0,25	Oberfläche aufgeschweißt

Tab. 1: Verschleißwerte verschiedener Hersteller bzw Betreiber

Verschleißuntersuchungen der KHD (Klöckner-Humboldt-Deutz) Humboldt Wedag AG ergaben weiterhin, daß die Schicht aus hartem, verschleißfestem Werkstoff mit der Zeit ungleichmäßig abgetragen wird. Nach einem anfänglich annähernd linearen Verlauf des Verschleißes nimmt dieser später nur noch degressiv zu [58].

Analog zu den Verschleißwerten gibt es sehr unterschiedliche Erfahrungen bezüglich Verschleißerscheinungen und Verschleißbild in Abhängigkeit von Mahlgut, Mahldruck und Walzenoberflächen-Werkstoff sowie Oberflächenstruktur.

Häufig wurde festgestellt, daß sich bei Anwendung eines sehr hohen Preßdruckes und hohen Schichtstärken der Verschleißpanzerung aus der ursprünglich zylindrischen Oberfläche der Walzenmäntel ein mulden- oder wannenförmiges Verschleißprofil herausbildet (siehe Abb.32). Die Walzen verschleißten an den Randbereichen nicht so stark wie an den übrigen Oberflächenbereichen [59]. Andere Betreiber stellten diese Verschleißerscheinung vorwiegend in der Inbetriebnahmephase fest [53]. Danach war der Material-

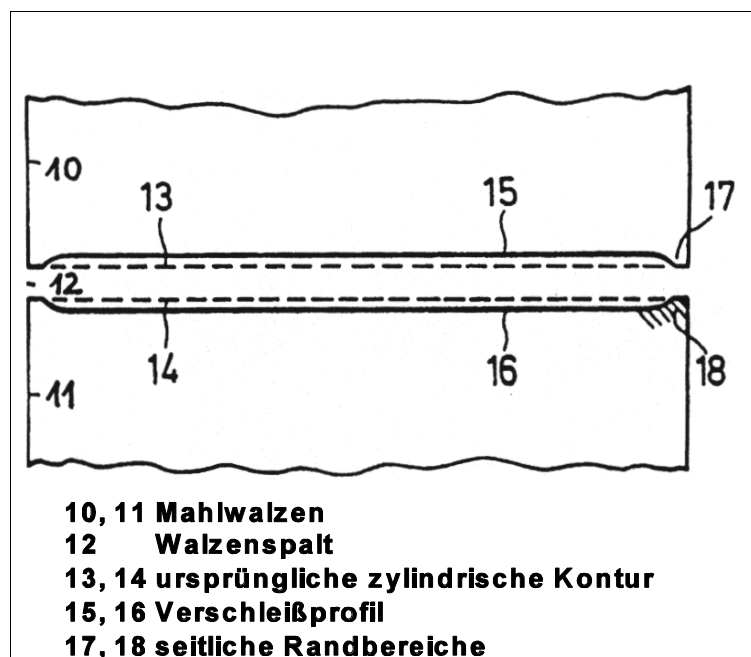


Abb.32: Wannenförmiges Verschleißprofil der Walzen einer Gutbett-Walzenmühle

abtrag über die gesamte Walzenbreite konstant.

Augenscheinlich besteht hier ein Zusammenhang mit dem axialen Druckprofil im Walzenspalt, welches zu den Stirnflächen der Walzen hin einen starken Druckabfall aufzeigte. Die Ursachen hierfür wurden bereits im Abschnitt 4.1 besprochen.

Eine weitere, oft auftretende Verschleißerscheinung ist das sog. "Peeling", das schalenförmige Ablösen der aufgeschweißten Hartschicht von der darunter befindlichen Pufferschicht, wie es z. B. bei Polycom-Gutbett-Walzenmühlen beobachtet wurde. Das eigentliche Schweißkonzept sowie "Peeling" sind in Abb. 33 dargestellt.

Ursache hierfür ist die hohe Druckbelastung mit häufig wechselnden Lasten. Bei geschweißten Mahlwalzen beispielsweise steigt das Ausfallrisiko von 1-2 % bei 100 % Mahldruck infolge einer Erhöhung des Mahldruckes um 30 % sprunghaft auf ca. 50 %. Die Ermüdung der Auf-



Abb.33: Peeling, Ablösen der Hartschicht

tragsschweißung ist von der Anzahl der Lastwechsel, was der Anzahl der Überrollungen entspricht, abhängig und damit von der Drehzahl der Walzen. Die Drehzahl aber wiederum bestimmt den Durchsatz und damit die Investitionskosten. Eine Optimierung dieser Parameter ist also erforderlich.

Die durch den Mahldruck auf die Walzen ausgeübten Belastungen und die daraus resultierenden Werkstoffbeanspruchungen waren anfangs im Detail nicht bekannt, und der negative Einfluß auf die Dauerfestigkeit der Aufschweißungen wurde nicht beachtet. Daher kam es bei einigen Anlagen bei einer Laufzeit von nur 200-400 h zu "Peeling", was durch Risse, die beim Schweißen der Hartschicht auftraten, stark beschleunigt wurde. Hinzu kamen bei den Polycom-Mühlen noch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Puffer- und Hartwerkstoff [38].

Diese Risse in der Panzerschicht sollten in der darunter liegenden, vergleichsweise weichen, duktilen metallischen Pufferschicht zum Stehen kommen. Es hat sich aber gezeigt, daß bei den extrem hohen Drücken, die bei der Gutbettzerkleinerung im Walzenspalt auftreten, Risse der harten Panzerschicht durch die Pufferlage hindurch in den Walzengrundwerkstoff eindringen können, besonders bei schwingender Belastung und Druckschwellbeanspruchung. Im nachfolgenden Abschnitt werden Möglichkeiten zur

Verhinderung der Rißausbreitung aufgezeigt [60].

Um das Guteinzugsvermögen der Preßwalzen zu verbessern, ist es bekannt, den gepanzerten Walzenmantel auf seiner geschlossenen harten Oberfläche mit einer Vielzahl vorspringender Profile, z. B. in Gestalt V-förmig angeordneter Schweißraupen, zu versehen. Es hat sich aber bei der Gutbettzerkleinerung besonders abrasiver Güter (z. B. Erze) gezeigt, daß die Walzenoberfläche durch Entstehung muldenförmiger Auswaschungen bzw. Ausgrabungen in den Bereichen zwischen den mit Abstand voneinander aufgebrauchten Schweißraupen verhältnismäßig schnell verschleißt, weil immer neues Material in die Zwischenräume zwischen den Profilierungs-Schweißraupen gepreßt wird und sich dort eingräbt. Durch Druckinsel-Bildung im gefüllten Walzenspalt mit hoher örtlicher Punktbelastung der Walzen kann die geschlossene harte Außenschale der gepanzerten Walzenmäntel überbeansprucht werden. Oberflächenrisse können zur Rißfortschreitung in den Walzengrundkörper führen, und/oder bei einer weichen Unterschicht können die aufgeschweißten harten Profileteile seitlich weggequetscht werden bzw. ausbrechen [61]. Ähnliche Verschleißerscheinungen wie beim "Peeling" können durch Fremdkörper hervorgerufen werden. Dabei können örtliche Überbeanspruchungen auftreten, welche die Dauerfestigkeit, z. B. einer Auftragsschweißung, stark reduzieren. Wenn im Dauerbetrieb auch nur einmal am Tag ein größerer metallischer Fremdkörper den Spalt passiert, so kommt es im Laufe der Zeit zu Dauerschäden, wie z. B. "Peeling" oder zu Haarrissen im Walzenkörper, u.a. deshalb, weil aufgrund der großen Masse der Walzen diese trotz des hydraulischen Systems nicht schnell genug ausweichen können. Ein Schutz der Maschinen durch sorgfältig geplante und justierte Eisenausscheider und Metallsuchgeräte ist daher dringend zu empfehlen. Gegen große Fremdkörper oder zu grobes Aufgabegut ist ein Schutzsieb nützlich. Auch zu grobes Aufgabegut kann zu örtlichen Druckspitzen führen. Eine andere Art der Überpressung kann bei inhomogenem Mahlgut auftreten. Werden grobe und feine Mahlgüter wie bei der Hybridmahlung aufgegeben und nicht ausreichend vermischt, kann das zum teilweisen "Durchschießen" des feinen Mahlgutes führen. Damit wirkt der gesamte Mahldruck an den Kontaktstellen zwischen Grobgut und Walzen. Hier spricht man von "Strangbildung". Die Folge ist auch hier eine Überbeanspruchung im Strang mit einem frühzeitigen Ausfall der Mahlwalzen [38, 40].

Weitere kritische Teile in bezug auf den Verschleiß bei Gutbett-Walzenmühlen stellen die

Bleche zur seitlichen Begrenzung des Walzenspaltes dar, welche aufgrund der Betriebserfahrungen ebenfalls aus verschleißfestem Material bestehen sollten [58].

4.3.2 Verschleißschutz

Für den Verschleißschutz stehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten zur Wahl, die jede für bestimmte Anwendungsfälle Vor- und Nachteile aufweisen:

- ! die bereits erwähnte aufgeschweißte Hartpanzerung,
- ! aufgeschrumpfte Bandagen aus verschleißarmem Stahl, z. B. Ni-hard,
- ! auswechselbare Segmente und
- ! die sogenannte Rasterpanzerung.

4.3.2.1 Die aufgeschweißte Hartpanzerung

Vorteile der Schweißtechnik sind:

- ! positive Profilierung der Mahlwalzen
- ! damit hohes Durchsatzvermögen
- ! schnelle Reparaturmöglichkeiten bei lokalen Ausfällen

Die Hartpanzerung wird in der Regel unmittelbar auf die Oberfläche der einteiligen (oder bei größeren Maschinen aus Welle und Walzenkörper zusammengesetzten) Walzen aufgetragen. Wenn zunehmender Verschleiß eine Erneuerung erfordert, kann man in der Maschine neu aufschweißen, d. h. man braucht die Walzen nicht auszubauen. Allerdings ist die Anzahl der Nachschweißungen bisher begrenzt, weil die unter der Hartpanzerung befindliche ebenfalls geschweißte Pufferlage bei den mehrmaligen Schweißungen sich mit dem harten Material vermischt und versprödet und dann auch erneuert werden muß [46].

Den typischen Lagenaufbau einer mit Puffer- und Panzerwerkstoffen auftraggeschweißten Mahlwalze, wie sie bei KHD Humboldt Wedag gefertigt wird, zeigt Abb. 34.

Im Ergebnis mehrerer Entwicklungsstufen besteht die Walze hier aus einem niedriglegierten aber höhergekohten CrNi-Stahl als Grundwerkstoff, zwei ferritischen Pufferla-

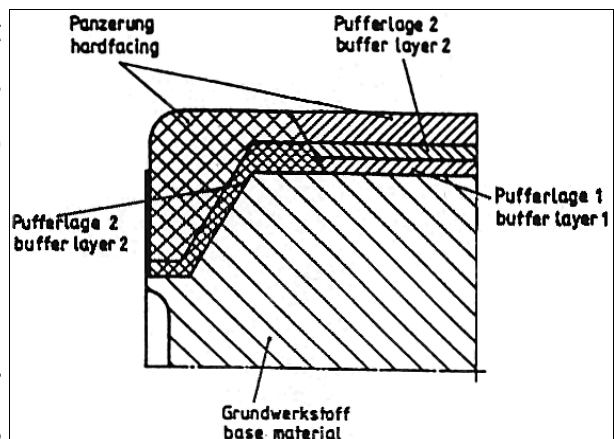


Abb.34: Aufbau der Panzerung (KHD)

gen mit ansteigenden Festigkeitswerten und einem Panzerwerkstoff, der aus einer martensitischen Matrix besteht. In diesen sind in gleichmäßiger, feiner Verteilung Sonderkarbide der Typen Cr, Nb, V als Verschleißträger eingelagert. Der Panzerwerkstoff besitzt eine Härte von 60-65 HRC [56].

Analog zu KHD ist eine Weiterentwicklung des geschweißten Verschleißschutzes von Scholz, E. im Europäischen Patent 0 361 172 A1 [60] erläutert. Hier besteht die Walzenbeschichtung aus wenigstens zwei auf dem Walzengrundkörper aufgebauten übereinanderliegenden Schichten solcher Werkstoffe, daß sich proportional zum radialen Ab-

stand der Schichten zum Walzengrundkörper ein allmählicher Härte- und Festigkeitsanstieg vom Walzengrundwerkstoff über die Zwischenschicht(en) zur Panzeraußenschicht ergibt. Damit werden Härtesprünge innerhalb der Walzenbeschichtung, insbesondere hervorgerufen durch zwischengelegte vergleichsweise weiche Pufferlagen, vermieden. Infolge des stufenlosen, gleichmäßig ansteigenden bzw. abfallenden Verlaufes von Härte und Festigkeit in radialer Richtung durch die Walzenbeschichtung kommen Risse, sofern sie in der verschleißfesten harten Außenschicht auftreten sollten, zum Stillstand und setzen sich nicht bis in den Walzengrundwerkstoff fort. Das Standzeitvermögen der Walzenbeschichtung ist somit auch bei einer dynamischen Druckschwellbeanspruchung vergleichsweise hoch. Als Beispiel für einen derartigen Verschleißschutz wird eine dreischichtige Walzenbeschichtung angegeben, mit einer 4 mm dicken inneren Schicht aus einem unlegierten ferritischen Werkstoff, einer ebenfalls 4 mm dicken mittleren Schicht aus einem Cr Mo-legierten ferritischen Werkstoff und einer 7 mm starken Außenschicht aus einer verschleißfesten Legierung folgender Zusammensetzung:

Legierungselement	C	Si	Mn	Cr	Mo	N
Gewichtsprozent	0,8 - 2,6	1,5 - 3,5	0,7 - 1,5	5,0 - 15,0	0,8 - 3,0	max. 0,1
Legierungselement	Al	Ti	V	Nb	Fe	
Gewichtsprozent	max. 0,2	0 - 10,0	0 - 10,0	0 - 15,0	Rest	

Tab.2: Zusammensetzung der Außenschicht lt. EP 0361 172 A1

Durch diese Legierung werden im geschweißten Zustand die sich metallurgisch widersprechenden Ziele Verschleißbeständigkeit, Rißfreiheit, Duktilität und Festigkeit erreicht [60].

Im Europäischen Patent 0 418 497 A1 wird von Keller eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der verschleiß- und betriebstechnischen Eigenschaften von geschweißten Oberflächenpanzerungen erläutert. Charakteristisch für diese Walzenpanzerung ist, daß beim Aufbau der Panzerung wenigstens die äußerste Panzerschweißlage nicht mehr durch ringförmig nebeneinanderliegende Schweißraupen oder durch eine endlose Spiraltraupe aufgeschweißt wird, sondern durch quer dazu liegende Schweißraupen hergestellt wird, die horizontal längs den Walzenmantellinien angeordnet sind. Die auf diese Weise hergestellte Panzerschicht kann eine Dicke von 4 mm aufweisen. Die Querschweißraupen können ohne Abstand bzw. mit einem Abstand kleiner 40 mm

aufgeschweißt sein, so daß die für den Walzenverschleiß ungünstigen Zwischenräume, die zu muldenförmigen Auswaschungen führen, praktisch entfallen. Damit wird neben dem Standzeitvermögen der Walzenpanzerung auch das Guteinzugsvermögen verbessert [62]. Eine höhere Sicherheit des Verschleißschutzes läßt sich zusätzlich noch durch verfahrenstechnische Maßnahmen erreichen. Eine Verringerung des Mahldruckes kann die Betriebssicherheit des geschweißten Mahlschutzes wesentlich beeinflussen. Nachteilig ist, daß ein reduzierter Mahldruck das Zerkleinerungsergebnis und die Energieeinsparung verschlechtert, da sich bei gleichbleibendem Fertiggutdurchsatz zwangsläufig die Umlaufzahl und somit die Schülpendicke erhöht. Die Konsequenz zur höheren Sicherheit des Verschleißschutzes aus verfahrenstechnischer Sicht lautet also: - dicke Schülpe; kleiner Druck [38].

Bei einer Reihe von Stoffen ist der Abtrag der Hartpanzerung so groß, daß wegen der begrenzten Dicke der Panzerschicht zu kurze Intervalle zwischen den Neuschweißungen auftreten. Vieles spricht dafür, daß feuchte, tonhaltige und zugleich scharfkantige Kristalle enthaltende Aufgabegüter unter hohem Druck im Walzenspalt etwas zu fließen beginnen und dann als "Schmirgelpaste" wirken. In solchen Fällen kann ein anderer Verschleißschutz günstiger sein [46].

4.3.2.2 Aufgeschrumpfte Bandagen

Aufgeschrumpfte Bandagen, z. B. aus Ni-hard, unterliegen in der Regel einem deutlich größeren Verschleiß in Gramm (g) Verschleißmaterial je Tonne (t) Aufgabegut als die Hartpanzerung. Sie bieten jedoch wesentlich mehr "Fleisch" für den Abtrag und ermöglichen deshalb längere Standzeiten. Nutzt man diese voll aus, ändert sich mit der Zeit der Walzendurchmesser nennenswert. Dies wirkt sich auf das Einzugsverhalten und andere verfahrenstechnische Parameter aus, was im Einzelfall nachteilig sein kann. Der Einzug des Aufgabegutes und damit die sich einstellende Schülpendicke sowie bei sonst gleichen Verhältnissen der Durchsatz der Maschinen sind mit glatten Ni-hard-Walzen ohnehin schlechter als mit der rauhen Auftragsschweißung. Bei ungleichmäßigem Verschleiß (meist im Walzenquerschnitt etwas wannenförmig; siehe auch Abschnitt 4.2.1) ist es nötig, die Walzenoberflächen durch Abschleifen oder Abdrehen gelegentlich zu

egalisieren [46].

Eine Möglichkeit, diesen zusätzlichen Arbeitsschritt einzusparen, wird von Partz im Europäischen Patent 0 383 004 A1 aufgezeigt. Die Walzen haben eine verschleißfeste Panzerung, entweder geschweißt oder einen gegossenen bzw. gewalzten Walzenmantel. Die Walzenoberfläche ist verschleißtechnisch so ausgebildet, daß die im Bereich der Walzenenden gelegenen seitlichen Anteile der verschleißfesten Oberfläche gezielt schneller verschleifen und dieser höhere Verschleiß dem Entstehen der seitlichen Wulste entgegenwirkt. Dies kann bei geschweißten Oberflächenpanzerungen dadurch geschehen, daß in den seitlichen Walzenrandbereichen bewußt weniger verschleißfeste Werkstoffe bzw. Werkstoffschweißlagen aufgebracht werden. Dies gilt sowohl für die Neufertigung als auch für die Regenerierung. Weisen die Walzen eine gegossene verschleißfeste Oberflächenpanzerung auf, so kann der Gußwerkstoff, z. B. auf der Basis von Chromhartguß, in den Randbereichen durch örtlich eingebrachte Erwärmung (Anlassen) weniger verschleißfest gemacht werden als in den übrigen Bereichen der Oberflächenpanzerung.

Eine weitere Möglichkeit für einen bewußt höheren Walzenkantenverschleiß besteht darin, daß an den Walzenenden der Walzendurchmesser über jeweils einen Übergangsbereich in Richtung zu den Walzenstirnseiten hin abnimmt. Diese Lösung ist in Abb. 35 dargestellt. Die Abnahme des Walzendurchmessers kann linear oder nach außen ballig gewölbt sein [59].

Ni-hard-Bandagen weisen höhere Verschleißraten auf, erlauben aber auch größere Verschleißschutz-Schichtdicken. Sie besitzen einige spezifische Nachteile, besonders bei großen Maschinen. Wenn alle anderen entscheidenden Para-

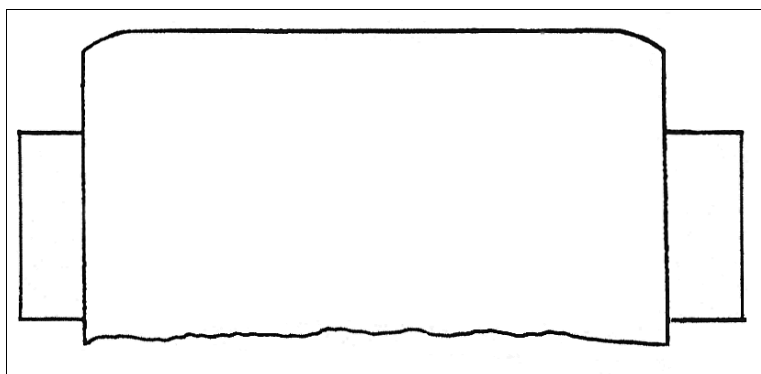


Abb.35: Verschleißgünstige Walzengeometrie

meter konstant gehalten werden, vergrößert sich der Walzenspalt infolge des Verschleißes. Damit steigt der Durchsatz, wodurch sich wiederum das Zerkleinerungsergebnis verschlechtert. Der hohe Verschleiß verschlechtert folglich das Leistungsvermögen der

Maschine. Das kann gegebenenfalls durch die Auswahl sehr teurer geschwindigkeitsverstellbarer, frequenzgesteuerter Elektroantriebe kompensiert werden, welche sonst nicht nötig wären. Weiterhin sind zusätzliche Messungen erforderlich, um die Position der Rollen dem reduzierten Rollendurchmesser anzupassen [57].

4.3.2.3 Auswechselbare Segmente

Auswechselbare Segmente aus Hartguß oder Stahl (wie sie auch schon früher bei Walzenbrikettpressen genutzt wurden) erfordern (entsprechend günstige Konstruktion vorausgesetzt) den geringsten Aufwand an Zeit und Personal für den Austausch. Die mit Segmentpanzerung ausgerüsteten Walzen bieten im Gegensatz zu Walzen mit Hartauftragsschweißung den Vorteil eines relativ einfachen Ein- und Ausbaus, ohne gleichzeitig die Walzen demontieren zu müssen. Angaben von Krupp Polysius [63] zufolge wird für den kompletten Austauschprozeß (Demontage der verschlissenen Segmente; Säuberung der Befestigungselemente; Montage der neuen Segmente; Hilfsarbeiten) pro Segment eine Stunde benötigt, d. h. je nach Größe der Mühle ca. 12 Stunden für die gesamte Panzerung.

Auch Segmente bieten reichlich Material für den Abtrag. Wegen des relativ schnellen Ausbaus kann man verschlissene Segmente in der Werkstatt nacharbeiten. Man muß nicht die ganze Maschine für die Dauer einer Nachschweißung außer Betrieb nehmen. Die Segmente erfordern eine sehr sorgfältige Bearbeitung der Auflagefläche, andernfalls besteht Bruchgefahr. Deshalb sind sie etwas teurer als andere Lösungen. Insbesondere bei großen Maschinen ist eine sichere und zugleich leicht lösbare Befestigung der Segmente problematisch. Vor allem in den Kimberlitanlagen und bei Maschinen zur Mahlung von Chromerz, also bei harten abrasiven Gütern, haben sich Segmente bisher als die beste Lösung er-

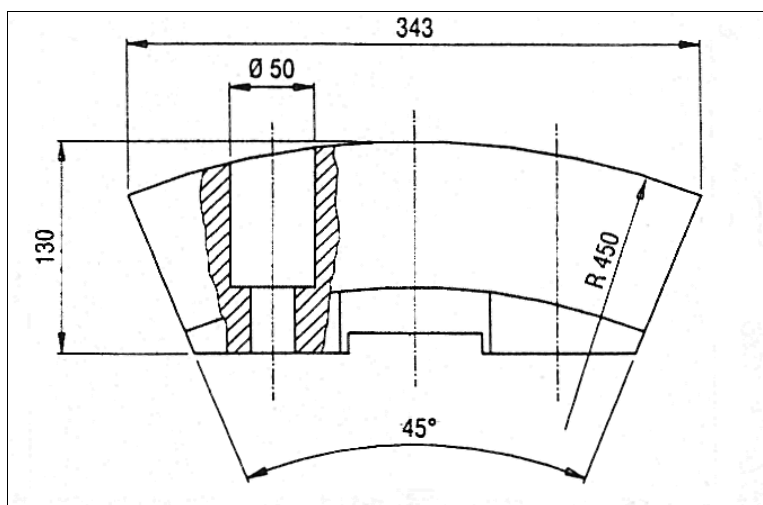


Abb.36: Prinzipskizze der KHD-Segmentkonstruktion

wiesen [46].

KHD testete Segmentpanzerungen (siehe Abb. 36) für seine Rollenpressen auf einer für die Kimberlitz-Zerkleinerung eingesetzten Maschine mit einem Walzendurchmesser von 900 mm und einer Walzenbreite von 250 mm. Die einzelnen Segmente sind mit 4 Sechskantschrauben auf der Walzenoberfläche befestigt. Das Drehmoment wird über große Paßfedern übertragen. Nach mehr als 0,5 Millionen Arbeitszyklen trat weder an den Segmenten selbst noch an den Befestigungselementen (Schrauben; Paßfedern) ein mechanischer Defekt auf. Die Verschleißrate lag bei etwa 2,3 g/t. Beim ersten großtechnischen Einsatz einer Gutbett-Walzenmühle mit aufgeschweißter Hartpanzerung in einer südafrikanischen Kimberlitaufbereitung wurden Verschleißraten zwischen 7 und 10 g/t gemessen [55].

Zwischen die Segmente eingedrungenes Erz ließ in diesem Bereich eine ziemlich glatte Oberfläche entstehen - durchaus vergleichbar mit einer auftragsgeschweißten Walze. Es verursachte weder Schäden noch Verschleiß. Die kurzen Stillstandszeiten, sowie die Tatsache, daß das Segment mehrfach abgeschliffen werden kann, ohne damit die Oberflächenhärte zu beeinträchtigen, wurden als weitere Vorteile hervorgehoben. Darüber hinaus können die verschlissenen

Segmente in der Gießerei wiederverwertet werden. Das Fehlen der von geschweißten Systemen bekannten Ringspannungen kann sich möglicherweise zusätzlich positiv auf die Standzeit auswirken [54].

FLS Products Division, Mill Systems berichtet ebenfalls von positiven Erfahrungen mit Segmentpanzerungen. So erhöhte sich die Standzeit des Verschleißschutzes auf 12.000 bis 20.000 Stunden, etwa das 2 - 3fache der Standzeit herkömmlicher geschweißter Panzerungen. Die Verwendung von

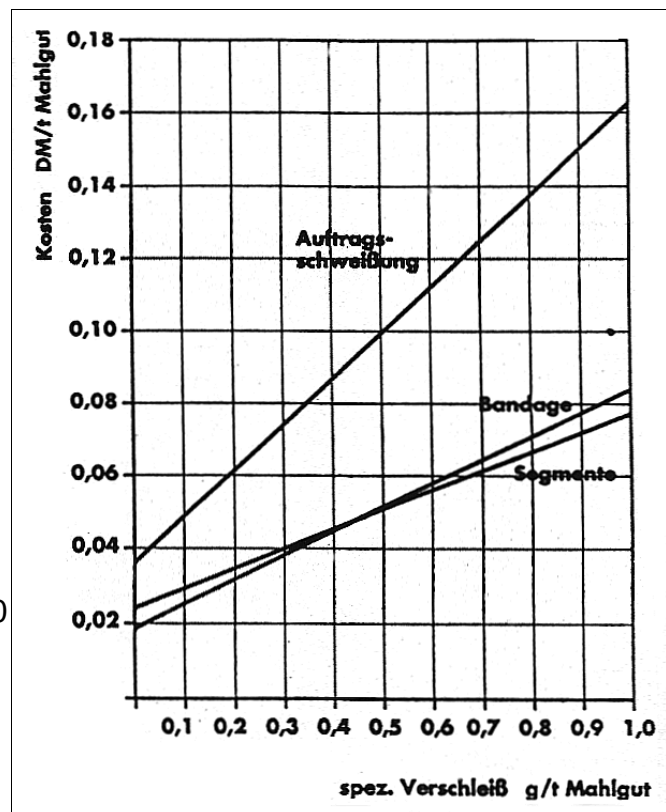


Abb.37: Verschleißkosten

Segmentpanzerungen bedeutet ein relativ hohes Durchmesser / Breite - Verhältnis. Bei FLS Rollenpressen liegt es zwischen 1,8 und 2,7. Ein positiver Nebeneffekt dieses Merkmals ist der größere Einzugswinkel, wodurch eine größere maximale Aufgabekorngröße ermöglicht wird, was zur Stabilisierung des Prozesses beiträgt [64].

Die Investitionskosten für die Segmentlösung liegen etwa 10-15% höher als bei geschweißten Walzen. Da die Verschleißkosten die Investitionskosten jedoch bereits nach einem Jahr übertreffen, spielen letztere keine entscheidende Rolle. Die Verschleißkosten einer Gutbett-Walzenmühle zeigt Abb.37.

Segmentpanzerungen werden gegenwärtig noch nicht in der Zementindustrie sondern hauptsächlich in der Bergwerksindustrie eingesetzt.

Gründe dafür sind:

- ! schlechteres Einzugsverhalten (durch glatte Oberfläche),
- ! hoher Materialbypaß durch glatte Walzenoberfläche, insbesondere bei Hybrid-, Fertig- und Kombimahlung,
- ! höhere Investitionskosten und
- ! ungeklärter Temperatureinfluß [38].

Analog zu aufgeschrumpften Bandagen hat der Verschleißschutz mit Segmentpanzerungen den Nachteil, daß aufgrund der großen Verschleißschutz-Schichtdicke zusätzliche Messungen und entsprechende Verstelleinrichtungen erforderlich werden können, um den Walzenspalt und damit die Betriebsbedingungen konstant zu halten. Ein noch zu erwähnender Vorteil des Verschleißschutzes mit Segmenten ist, daß auf diese Weise eine größere Zahl unterschiedlicher verschleißfester Werkstoffe zur Verfügung steht.

4.3.2.4 Rasterpanzerung (Stud lining)

Die beste Form des Verschleißschutzes für viele Gebiete der Aufbereitung mineralischer Stoffe ist ein autogener Verschleißschutz. Hierfür werden hochverschleißfeste Hartmetallstifte in einem bestimmten Rastermaß in die Walzenoberfläche eingearbeitet. Die Geometrie ist so gewählt, daß sich bereits zerkleinertes kompaktiertes Material in den Zwischenräumen zwischen den Stiften ablagert. Die so entstandene verfestigte Materialschicht bildet den gewünschten autogenen Verschleißschutz. Dieses Prinzip ist in Abb.38

dargestellt.

Besonders vorteilhaft bei diesem Verschleißschutz ist die Tatsache, daß sich diese Materialschicht bei Verschleiß selbständig regeneriert, d. h. abgetragenes Material wird sofort durch neues kompaktiertes Gut ersetzt.

Weitere Vorteile des "Stud lining" bestehen darin, daß die räumliche Aufteilung, die Länge und der Durchmesser der Hartmetallstifte entsprechend

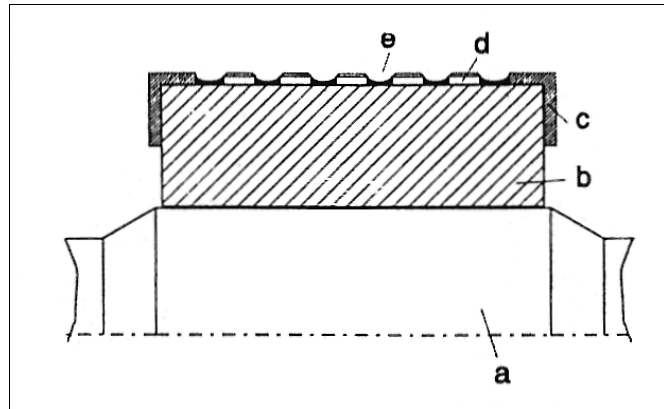


Abb.38: Schema der Rasterpanzerung

a: Welle

b: Walzenkörper

c: Kantenschutz

d: Hartmetallstifte

e: "autogene" Verschleißschutzschicht

dem zu mahlenden Gut angepaßt werden können, sowie die Tatsache, daß die Verwendung von speziellen Hartmetalllegierungen aufgrund des geringen Prozentsatzes der Hartmetallstifte an der Gesamtoberfläche ökonomisch vertretbar ist. Die Prozeßparameter werden durch die Verwendung der Rasterpanzerung nicht negativ beeinflusst. Ein wichtiger positiver Nebeneffekt ist, daß sich das Einzugsverhalten verbessert. Dadurch können Durchsatzsteigerungen bis zu 25 % erreicht werden [55, 36].

Aufgrund ihrer positiven Erfahrungen mit der Rasterpanzerung werden z. B. bei KHD Humboldt Wedag mit Ausnahme einiger Spezialfälle nur noch Rollenpressen mit "Stud lining" gefertigt. Bei Versuchen von KHD wurden bei der Zerkleinerung von feuchtem Kalkstein und Siliziumsand mit der Rasterpanzerung (Stiftlänge 10 mm) Standzeiten von mehr als 25.000 Stunden erreicht. Im Vergleich dazu mußte eine aufgeschweißte, 8 mm starke Hartpanzerung nach 1.000 Stunden regeneriert werden. Langzeitversuche in Eisenerz-Aufbereitungsanlagen ergaben nach 4.000 Betriebsstunden einen Verschleiß der Hartmetallstifte von 1 mm. Anfängliche Probleme mit der Befestigung der Hartmetallstifte auf der Walzenoberfläche wurden inzwischen gelöst [65].

Voraussetzung für die Bildung der autogenen Schutzschicht ist, daß das Material ausreichend kompaktierfähig ist. Einige Aufgabematerialien, z. B. trockener Quarz, der weniger feste Schülpfen liefert, sind eher ungeeignet für dieses Verfahren. In diesem Fall können die Zwischenräume zwischen den Hartmetallstiften auch vorab mit einem fremden zusammengepreßten feinkörnigen Gut ausgefüllt werden (im Baubereich z. B. ein

Zementklinker/Gips-Gemisch oder im Erzbereich hochverschleißfestes Keramikmaterial). Um die Haftung des so aufgetragenen autogenen Verschleißschutzes in den Profilzwischenräumen noch zu erhöhen, können zusätzlich Bindemittel verwendet werden [61].

Eine vom Prinzip her der Rasterpanzerung ähnliche Oberflächenpanzerung ist im Europäischen Patent 0 443 195 A1 [61] dargestellt. Abb.39 zeigt die zwei Walzen mit dem entsprechenden Oberflächenprofil.

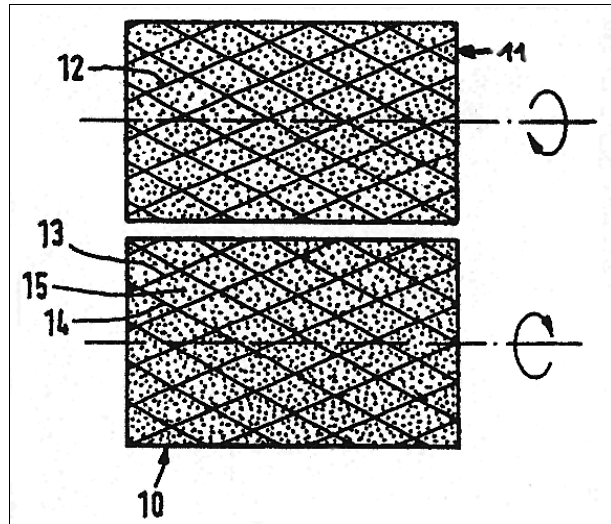


Abb.39: Oberflächenprofil lt. EP 0 443 195 A1

10; 11...	Mahlwalzen
12; 13; 14...	Profilleisten
15...	Profiltaschen

Charakteristisch für diese Walzenpanzerung ist auch hier, daß die Profile in der Lage sind, das zwischen ihnen eingepreßte Gut festzuhalten, welches somit als autogener Verschleißschutz dient. Die Profile sollten einen Abstand kleiner 40 mm und eine Höhe größer 5 mm haben. Das Guteinzugsvermögen kann zusätzlich gesteigert werden, wenn benachbarte Profile unterschiedliche Höhen aufweisen. Die Profile können aus Leisten bestehen, die in walzenaxialer Richtung oder in einem Winkel von 0- 90° dazu angeordnet sind. Hier wie auch bei der Rasterpanzerung können einzelne herausgebrochene Profile bzw. Hartmetallstifte durch Aufschweißen relativ leicht instandgesetzt werden.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Konzeption der Versuchsanlage

Überlegungen zum Aussehen einer nutzbringenden Versuchsanlage wurden dahingehend angestrengt, inwieweit der technische Ablauf der Gutbettzerkleinerung zwischen zwei sich gegensinnig drehenden Walzen zu vereinfachen sein wird, um dennoch den realen Vorgang abzubilden. Anzumerken sei hier beispielhaft die sich praktisch im "Selbstlauf" während des Betriebs einstellende Gutbettdicke bzw. Spaltweite.

Es wurde herausgearbeitet, daß der Vorgang der Gutbettzerkleinerung sehr wohl mit Hilfe einer geeigneten Presse zu modellieren ist, aber das komplexe System der Gutbett-Walzenmühle aus verschleißtechnischer Sicht mit den sich bietenden, bereits bekannten Verschleißprüfeinrichtungen immer nur zu einem Teil simuliert werden kann.

Als Ergebnis kristallisierte sich heraus, daß keine Alternativen zum Bau einer Versuchsgutbett-Walzenmühle in Frage kommen, wenn man dem Ziel der angestrebten Praxisrelevanz so nahe wie möglich kommen will.

Der Entscheidung für eine Gutbett-Walzenmühle folgten Betrachtungen zur Dimensionierung der Walzen. Es war wichtig, eine geeignete Größe zu finden, um den Versuchsaufwand in händelbaren Grenzen zu halten. Betrachtet man allein den entstehenden Aufwand beim Materialtransport, rechtfertigt sich dieser Gedanke bereits.

Andererseits mußte auch der Fakt berücksichtigt werden, daß die in der Praxis zur Anwendung kommenden Werkstoffe bereits eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen. Das heißt, um einen meßbaren Verschleiß zu erzielen, muß, im Hinblick auf den Materialaufwand, der Durchsatz auch dementsprechend hoch sein.

Desweiteren war es notwendig, sich über die Methodik der Verschleißmessung zu verständigen. Der zu erwartende niedrige Verschleißwert erforderte eine präzise Meßapparatur, die wiederum nur bis zu einer bestimmten Größe erschwinglich ist. Parallel dazu stellte sich die Frage der Bedienungsfreundlichkeit hinsichtlich des Wechselns der Verschleißwerkstoffproben.

In den folgenden Gliederungspunkten wird auf die aufgeworfenen Fragen eingegangen.

5.2 Aufbau der Versuchsanlage

Im Anschluß an die Projektierung, den Bau und die Beschaffung der notwendigen Komponenten der Versuchsanlage wurde selbige in einem Steinbruch aufgestellt.

Die Versuchsanlage besteht aus mehreren Bauteilen. Herzstück der Anlage ist eine Gutbett-Walzenmühle (Abb.40). Die Walzen haben einen Durchmesser von 300 mm und eine Arbeitsbreite von 70 mm.

Das zu zerkleinernde Material wird mit Hilfe eines Radladers in einen ca. 5m³ fassenden Vorbunker aufgegeben (Abbildung 41). Von diesem aus gelangt das Gut über ein Förderband in den Wäge- und Dosierbunker, der direkt über der Gutbett-Walzenmühle angeordnet ist (Bild 42, im Hintergrund).

Nach dem Öffnen der am Wägebunker angebrachten Schleuse steht das Material als Gutsäule über dem Walzenspalt. Diese Art der Zuführung des Gutes in den Walzenspalt wurde gewählt, um das Einzugsverhalten der Maschine zu verbessern.

Das Brechprodukt (Schülpen) wird über eine Förderbandkombination abgeführt. Die beiden Walzen sind mit jeweils 8 Segmenten bestückt. Die Segmentierung der Walzen ist, wie bereits in den theoretischen Betrachtungen ausgeführt wurde, durchaus praxisrelevant. Beim Versuchsstand wurde diese Variante vorrangig deshalb gewählt, um eine gewisse statistische Sicherheit der Versuchsergebnisse zu garantieren. Gleichfalls wird die Flexibilität der Anlage erhöht. So können beispielsweise mehrere Verschleiß-



Abb.40: Gutbett-Walzenmühle



Abb.41: Aufgabebunker mit einem Fassungsvermögen von 5 m³

werkstoffe gleichzeitig getestet werden. Ein weiterer Grund ist der relativ leichte Aus- und Einbau der Segmente und die Möglichkeit, den Gewichtsverlust nach jedem Versuch aufgrund von überschaubarer Größe und Gewicht des Segments mit Hilfe einer Präzisionswaage zu ermitteln. Der Zusammenbauzustand wird in Abb. 43 gezeigt.

Bei Nutzung des Versuchsstandes mit der Standardausrüstung bestand die Möglichkeit, die Stromstärke, die Drehzahl der Walzen und den Hydraulikdruck im System über Analog- bzw. Digitalanzeigen während des Betriebes abzulesen.

Da diese Erfassungsmethode für die Auswertung von Dauerversuchen einerseits sehr aufwendig und andererseits nicht weniger ungenau ist (Ungenauigkeit der Meßgeräte, Ablesefehler bei Analoganzeigen), und die Werte über die Versuchsdauer ständigen dynamischen Änderungen unterworfen sind, die durch die recht trägen Anzeigen nicht oder nur verfälscht (zeitverschoben u. a.) wiedergegeben werden können, wurde nach einer Verbesserung der Meßwerterfassung gesucht.

Parallel zu diesem Problem mußte eine Möglichkeit gefunden werden, um den sich ständig ändernden Betriebsspalt zwischen den Wal-

zen zu erfassen. Die Schwierigkeit dabei ist, daß im Betrieb die Achsen von Los- und Festwalze nicht parallel liegen müssen, sondern durch einerseits ungleichmäßige Korngrößenverteilung im Walzenspalt oder andererseits durch ungleichmäßige Beschickung



Abb.42: Materialzuführung



Abb.43: Walze mit Segmenten

des Walzenspaltes eine "Querstellung" der Loswalze hervorgerufen werden kann.

Dieser Fakt führte zu der Überlegung, die Meßapparatur mit zwei potentiometrischen Wegaufnehmern auszustatten (Bild 44). Die Meßsignale können mit einem DATA-shuttle erfaßt und mit Hilfe eines angeschlossenen Computers gespeichert und weiterverarbeitet werden. Das Format, mit dem die Meßwerte gespeichert werden, erlaubt eine problemlose Bearbeitung beispielsweise in einem Tabellenkalkulationsprogramm.

Das verwendete DATA-shuttle verfügt über insgesamt 8 Eingangskanäle zur Erfassung von Signalen. Zwei Kanäle werden zur Erfassung der Spaltweite genutzt. Die sechs noch zur Verfügung stehenden Kanäle können nun dazu verwendet



Abb.44: Wegaufnehmer

werden, das oben bereits angesprochene Problem zu lösen. Die Werte für Stromstärke, Walzendrehzahl und Hydraulikdruck können somit gleichfalls mit Hilfe des DATA-shuttles rechenstechnisch erfaßt und verarbeitet werden.

Die Impulsrate des DATA-shuttles liegt bei ca. 1000 s^{-1} . Durch Verwendung dieser Technik werden Fehler bei der Meßwert-erfassung auf ein geringstes Maß beschränkt.

Ein weiterer Eingangskanal wird genutzt, um die Signale des am Dosier- und Wä-



Abb.45: Rechenstechnische Meßwert-erfassung

gebunker angebrachten Biegebalkens aufzufangen, die anschließend zur Gewichtsbestimmung genutzt werden. Somit kann einwandfrei auch der Durchsatz der Maschine zu jedem beliebigen Zeitpunkt bestimmt werden.

5.3 Versuchsplanung

Um eine Versuchsplanung aufstellen zu können, war es erst einmal notwendig, alle Parameter zu erfassen, die sich an einer solchen Versuchsapparatur variieren lassen. In der folgenden Tabelle wird die so entstandene Übersicht gezeigt.

Verschleißwerkstoff	maschinentechnische Parameter	gesteinsspezifische Parameter
Werkstoffart	Walzenumfangsgeschwindigkeit	Gesteinsart
Oberflächenkontur	spezifische Preßkraft	Korngröße
	Spalt im Leerlauf (Nullspalt)	Feuchtigkeit

Setzt man nun für alle genannten Parameter die geplanten bzw. möglichen Varianten ein, erhält man folgendes:

Verschleißwerkstoff	maschinentechnische Parameter	gesteinsspezifische Parameter
OA 600 WM - glatt Vautid 100 - glatt Vautid delta - glatt HEXADUR1 - Fliese HEXADUR2 - Fliese	0...1m/s	Diabas Quarzit Kimberlit Klinker Eisenerz Kupfererz
	0...8 N/mm ²	2...10 mm
	0...5 mm	natürliche Feuchtigkeit

Es waren also Versuche mit 5 verschiedenen Verschleißwerkstoffen und 6 verschiedenen Abrasiven zu planen. Der bereits angesprochene zu erwartende enorme Zeitaufwand allein für einen Versuch zwang dazu, das Versuchsprogramm insoweit zu straffen, als daß alle praxisrelevanten Paarungen (Werkstoff-Abrasiv) getestet werden konnten. Desweiteren war geplant, ein Referenzabrasiv bei allen Verschleißwerkstoffen einzusetzen. Als Referenzabrasiv kam Diabas zur Anwendung. Diabas wird in nächster Nähe des

Versuchsstandes abgebaut und lag, im Gegensatz zu den anderen Abrasiven in ausreichender Menge vor.

An den maschinentechnischen Parametern wurde im Anschluß an die noch zu beschreibenden Vorversuche weitestgehend nichts geändert. Es wurden die in der Praxis üblichen Werte von 1 m/s Umfangsgeschwindigkeit und 8 N/mm² spezifische Preßkraft eingestellt. Diese Grundeinstellung ermöglicht es, die gewonnen Ergebnisse untereinander vergleichbarer zu machen. Für alle Versuche wurde ein Nullspalt von 0,5 mm eingestellt.

5.4 Einführende Versuche

5.4.1 Strategie

Zum Kennenlernen der Anlage wurden einführende Versuche durchgeführt, die gleichzeitig dem Sammeln von Erfahrungen beim Aufnehmen und Verarbeiten der Meßwerte dienen sollten. Allerdings sollte auch das Verschleißverhalten über einen weiten Regelbereich der Maschine untersucht werden.

Der Verschleiß wurde als Gewichtsverlust ermittelt. Die Wägung erfolgte auf einer Präzisionswaage.

Als Verschleißwerkstoff diente OA600WM, das auf einen Segmentgrundkörper aufgeschweißt wird. OA600WM ist ein auch in der Praxis auf Gutbett-Walzenmühlen angewendeter verschleißfester Werkstoff mit folgender Zusammensetzung:

	C	Cr	Ti	V	Nb	Mo	Mn	Fe
OA 600 WM	1,2	4,9	-	0,8	5,6	1,7	1,3	-

Als Abrasiv kam Diabas zur Anwendung. Gründe dafür wurden bereits genannt.

Die Versuchsplanung sah vor, die Walzenumfangsgeschwindigkeit in einem breiten Bereich zu variieren. So wurde die Geschwindigkeit stufenweise von 0,23 m/s bis auf 1 m/s erhöht. Pro Umfangsgeschwindigkeit wurden 3 Einzelversuche durchgeführt. Das Ziel dieser Strategie bestand darin, herauszufinden, inwieweit die doch ähnlichen Einzelversuche auch ähnliche Ergebnisse liefern.

5.4.2 Verschleißmessung

Die Auswertung der Versuche erbrachte Verschleißwerte, die im Diagramm in der

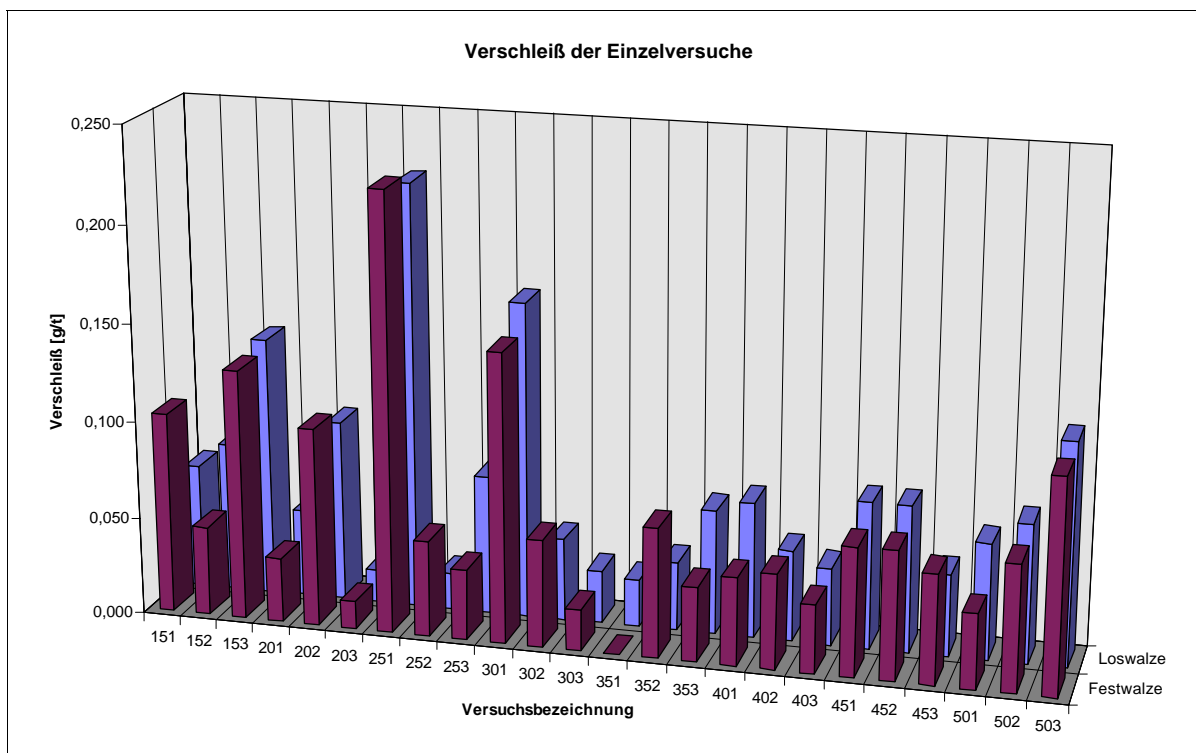


Abb.46: Aufstellung der Verschleißwerte der einführenden Versuche

Abbildung 46 dargestellt sind. Die dreistellige Nummer der Versuchsbezeichnung kennzeichnet mit den ersten beiden Stellen die Drehzahl und mit der dritten Stelle den Teilversuch.

Es ist ersichtlich, daß unterschiedliche Ergebnisse bei scheinbar gleichen Versuchsbedingungen auftreten. Bei Betrachtung der einzelnen Geschwindigkeiten fällt auf, daß vornehmlich der erste der drei Teilversuche nach oben bzw. nach unten abweichende Ergebnisse erbrachte. Das führte zu der Schlußfolgerung, daß bei Änderung eines beliebigen Versuchsparameters stets auch eine Phase des Einlaufverschleißes erwartet werden muß. Die Abläufe in einer solchen Einlaufphase sind bis heute nicht exakt geklärt. Um zu realen Verschleißwerten zu kommen, bedarf es also einer gewissen Einlaufzeit. Diese Erkenntnis führte dazu, den ersten der 3 Teilversuche als Einlaufphase zu benutzen und für die eigentliche Verschleißmessung die Werte der Teilversuche 2 und 3 heranzuziehen. Diese zwei Werte wurden zu einem Verschleißwert pro Geschwindigkeit

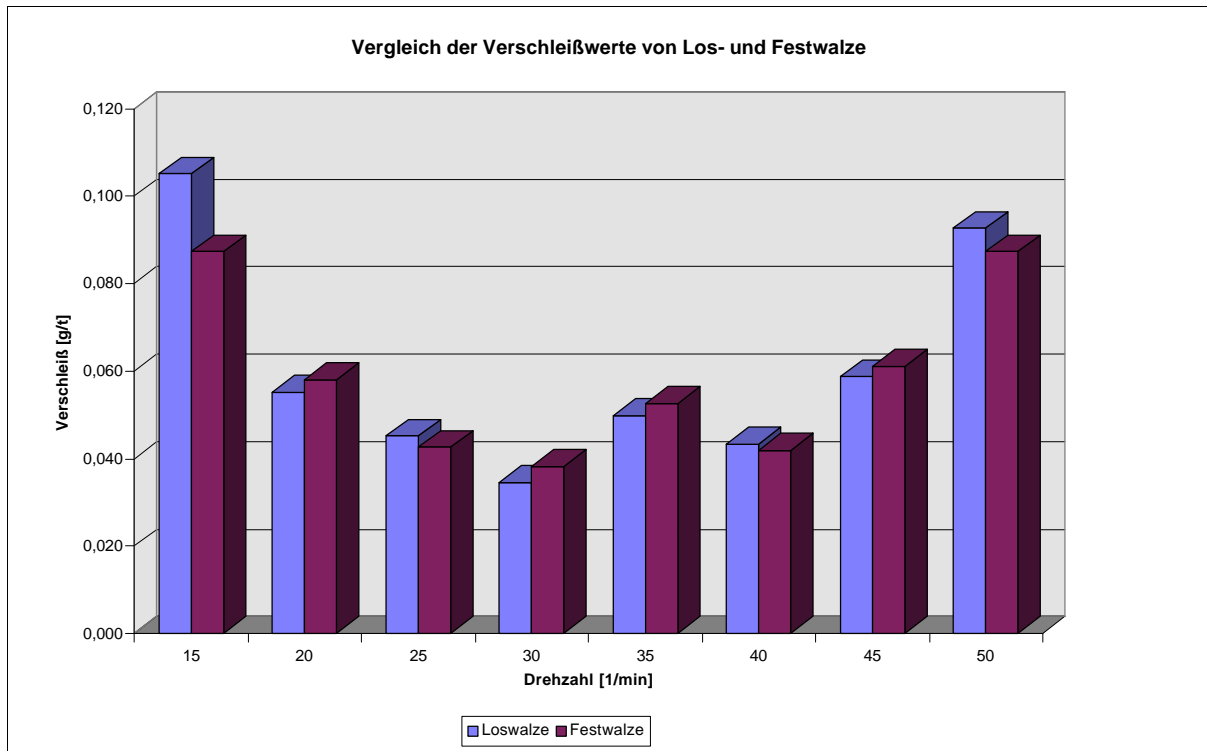


Abb.47: Verschleißmittelwerte für einzelne Geschwindigkeiten, getrennt nach Los- und Festwalze zusammengefaßt und in einem Diagramm dargestellt (Abb.47). Die Werte von 15 bis 50 min^{-1} beschreiben eine wannenförmige Kurve. Erklärbar ist dieses Phänomen mit der Überlagerung der verschiedenen zur Wirkung kommenden Verschleißmechanismen Abrasion und Ermüdung (Oberflächenzerrüttung) und deren unterschiedlichen prozentualen Anteil am Gesamtverschleißprozeß bei Variation der Drehzahl. Bei geringen Geschwindigkeiten überwiegt der Prozeß der Indentation, d. h. des Eindrückens der Körner in die Walzenoberfläche. Das Korn kann aufgrund seiner verhältnismäßig langen Verweilzeit im Bereich des engsten Spaltes die Oberfläche auf die genannte Art entsprechend länger schädigen. Hingegen ist hier der Anteil an Abrasion eher gering. Bedingt durch die geringe Umfangsgeschwindigkeit der Walzen kann das Gut recht schnell auf selbige beschleunigt werden. Eine Relativbewegung zwischen Walzenoberfläche und Gut ist gering oder bleibt gar aus.

Bei Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit bis auf 30 min^{-1} nimmt die Verweilzeit des Gutes im Bereich des engsten Spalt logischerweise ab. Der prozentuale Einfluß der Indentation nimmt ab. Das Gut kann jedoch noch recht schnell auf Umfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Somit sind auch für die Abrasion noch keine günstigen Voraussetzungen geschaffen. Von 30 bis 50 min^{-1} steigt der Verschleiß wieder an. In diesem

Bereich kann davon ausgegangen werden, daß der Anteil an Abrasion überwiegt. Der reale Weg, den das Gut zurücklegt, bis es auf Umfangsgeschwindigkeit der Walzen beschleunigt wurde, ist größer geworden. Durch die daraus folgende Verlängerung des effektiven Gleitweges kann das Korn auch länger ritzend auf die Walzenoberfläche einwirken. Je weiter diese Relativbewegung des Gutes zur Walzenoberfläche in Richtung des engsten Spaltes ausgedehnt wird, um so

größer ist die Verschleißrate durch Abrasion, weil das Gutkorn unter stetig zunehmendem Druck ritzen kann.

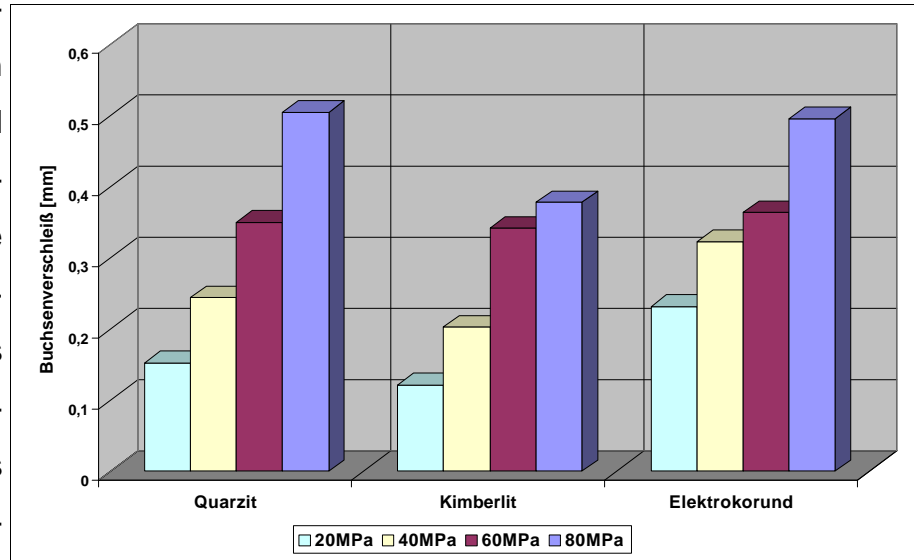


Abb.48: Buchsenverschleiß bei verschiedenen Abrasiven

größer ist die Verschleißrate durch Abrasion, weil das Gutkorn unter stetig zunehmendem Druck ritzen kann.

Diese Aussage wird unter anderem auch durch Versuchsergebnisse bekräftigt, die vom Verfasser während seiner Diplomarbeit bei Versuchen am Bolzen-Gelenk-Verschleißprüfstand ermittelt wurden. In Abbildung 48 werden die Verschleißwerte der Buchse bei steigendem nominellen Kontaktdruck und einer Schwenkgeschwindigkeit von 1 m/s und einem Schwenkwinkel von 45° dargestellt. Man sieht sehr deutlich den Anstieg der Verschleißwerte bei Steigerung des nominellen Kontaktdruckes.

Die auf dem Bolzen-Gelenk-Versuchstand ermittelten Versuchswerte wurden herangezogen, da die Kontaktverhältnisse, das Einzugsverhalten und die Höhe der Belastungen in einem solchen Versuch in etwa mit den Verhältnissen der Gutbett-Walzenmühle vergleichbar sind. Die Existenz einer Relativbewegung und die Möglichkeit eines direkten Metall-Metall-Kontaktes beim Bolzen-Gelenk-Versuch unterscheiden ihn von der Gutbettwalzenmühle. Jedoch charakterisieren die Ergebnisse des Bolzen-Gelenk-Versuches das durch die Abrasivität des Zwischenstoffs hervorgerufene Verschleißverhalten bei Steigerung des Kontaktdruckes.

Von der tendenziellen Übereinstimmung der Ergebnisse beider Versuchsapparaturen

kann ausgegangen werden. Unumstritten aber ist die Tatsache, daß diese Aussagen mit Versuchen an der Gutbett-Walzenmühle untermauert werden müssen. Zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Schrift lagen die Werte dieser Versuche noch nicht vor.

5.4.3 Aussagen zu aufgenommener Leistung und Durchsatz

Für praxisrelevante Aussagen ist es dringend erforderlich, dem gemessenen Verschleiß den bei dem jeweiligen Versuch erreichten Durchsatz sowie die eingebrachte Zerkleinerungsenergie gegenüberzustellen. Es ist logischerweise wenig sinnvoll, auf einen Werkstoff zu bauen, der zwar über einen hervorragenden Verschleißwiderstand verfügt, der jedoch nur vergleichsweise geringe Durch-

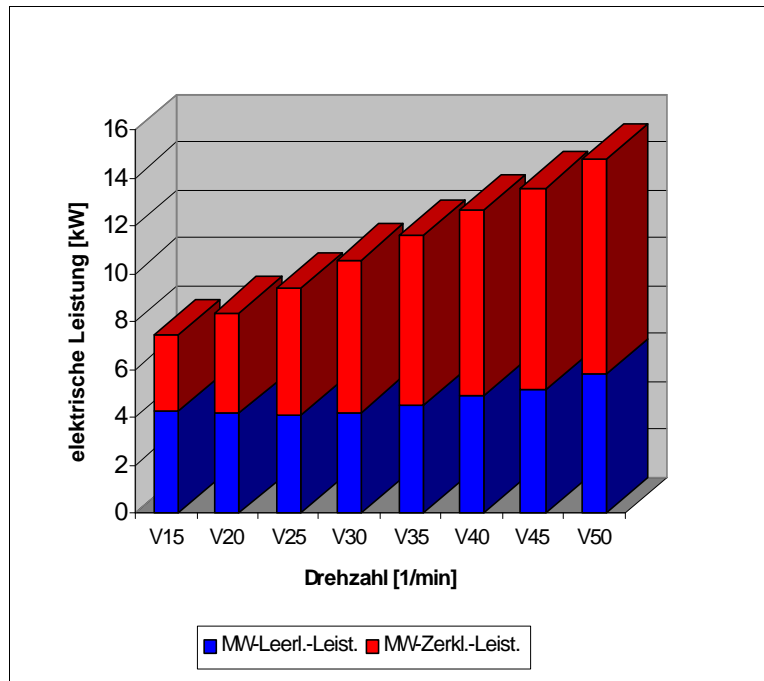


Abb.49: aufgenommene Gesamtleistung (Mittelwert)

sätze ermöglicht. Die Gründe dafür seien dahingestellt. Betrachtet man nun die in der Abbildung 49 dargestellten Mittelwerte der aufgenommenen Gesamtleistung, so ist ein nahezu linearer Anstieg in Richtung höherer Walzenumfangsgeschwindigkeiten zu erkennen. Stellt man jedoch die Leerlauf- und die Zerkleinerungsleistung getrennt in einem Diagramm

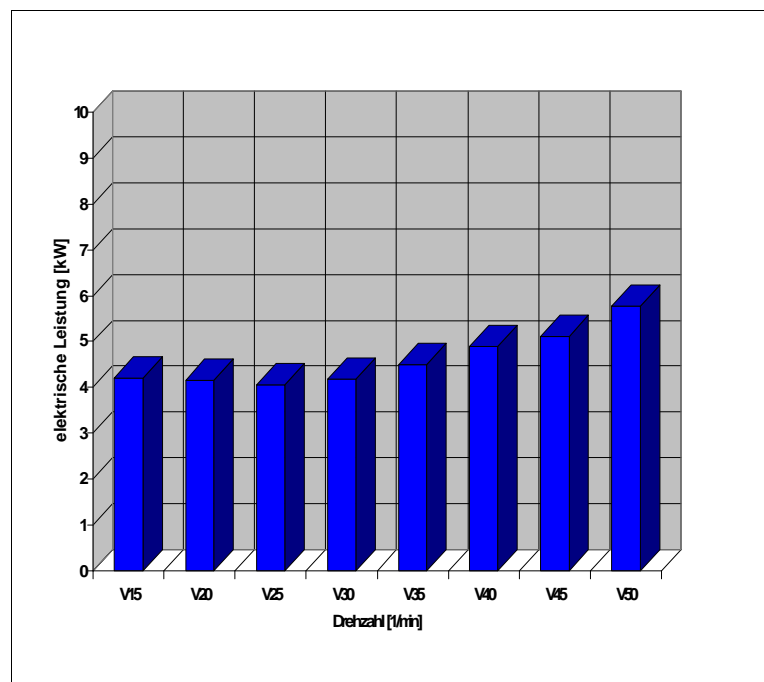


Abb.50: Leerlaufleistung (Mittelwert)

dar, so ist die geschilderte Linearität nur in bestimmten Bereichen wiederzufinden.

Die Leerlaufleistung in Abb. 50 ist ein Mittelwert aus Leerlaufleistung vor und nach dem Versuch.

Von 15 bis 30 min^{-1} ist der Wert der aufgenommenen Leer-

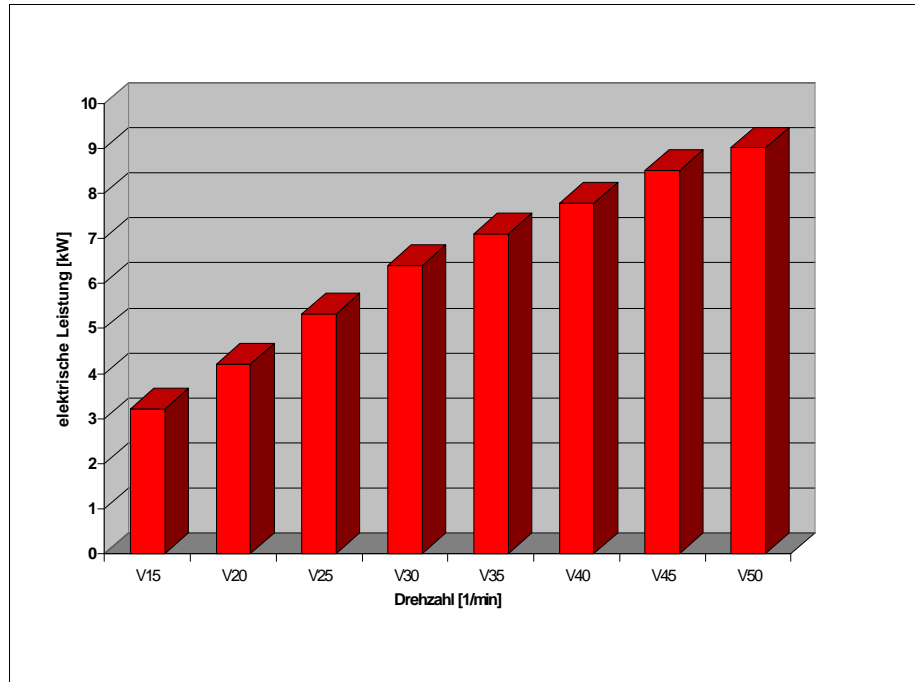


Abb.51: Zerkleinerungsleistung (Mittelwert)

laufleistung in etwa gleich. Ab 35 min^{-1} jedoch steigt die Leerlaufleistung linear an.

Die Zerkleinerungs-

leistung (Abb. 51)

hingegen steigt linear bis 30 min^{-1} an.

Bei einer Drehzahl von 35 min^{-1} wird der lineare Anstieg geringer. Es ist zu vermuten, daß die

Zerkleinerungsleistung bei höheren Drehzahlen einem oberen Grenzwert

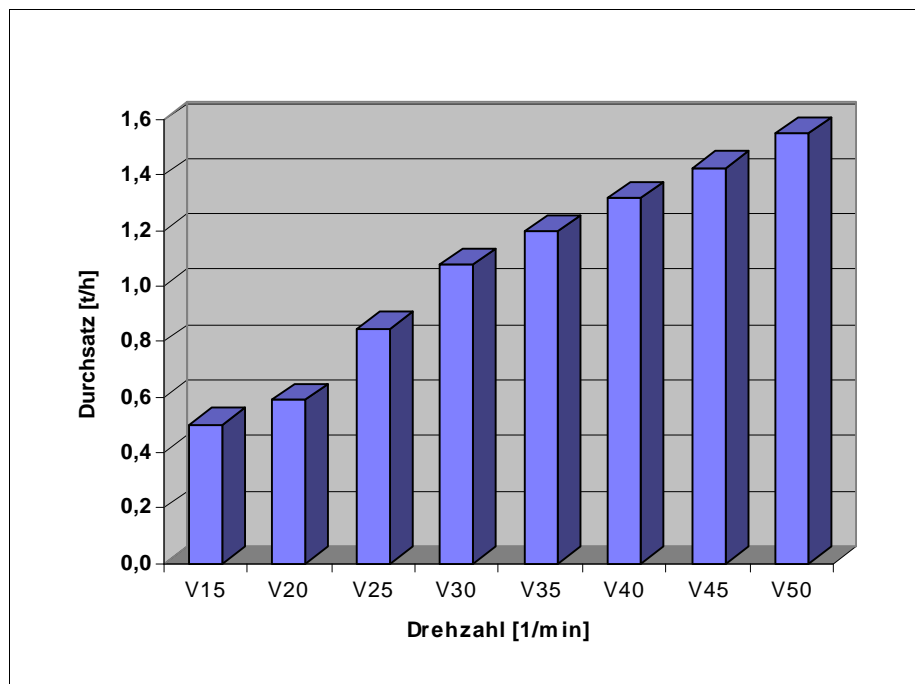


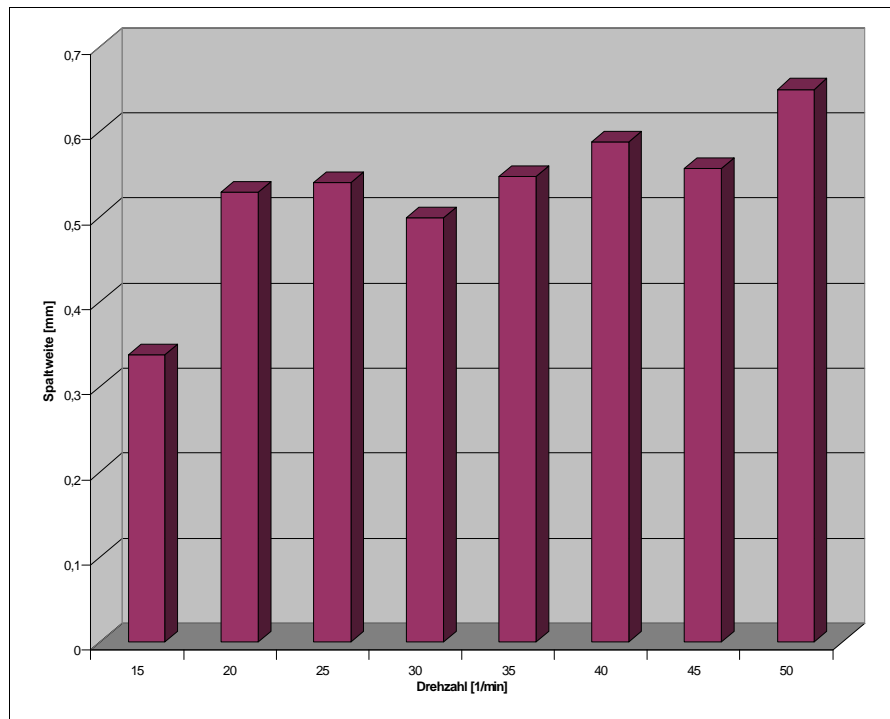
Abb.52: Durchsatz (Mittelwert)

entgegenstrebt. Un-

terstützt wird diese Aussage durch die im Punkt 4.1.3 dargelegten Kenntnisse. Ab einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit kann nicht mehr genügend Gut in den Spalt einge- zogen werden. Dadurch wird der Effekt der Gutbettzerkleinerung gestört bzw. bricht ganz

ab. Die Verhinderung des Gutbettaufbaus hat zur Folge, daß auch nicht genügend Energie zur Zerkleinerung eingebracht werden kann.

Diese Deutung der Ergebnisse führt zu der Schlußfolgerung, daß bei weiterer Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit eine wesentliche Erhöhung der eingebrachten Zerkleinerungsenergie nicht zu erwarten ist. Die Entwicklung des Durchsatzes ist in Abb. 52 dargestellt.



Hier bekommt man **Abb.53:** Betriebsspaltweite ohne Nullspalt (Mittelwert)

eine Bestätigung für

die vorher getätigte Aussage. Durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit steigt der Durchsatz zuerst stark an. Ab 30 min^{-1} jedoch wird der Anstieg nahezu linear.

In der Abbildung 53 wurde die Entwicklung der Betriebsspaltweite in Abhängigkeit von der Drehzahl zusammengestellt. Die Spaltweite ist ein Maß für die Stärke des aufgebauten Gutbettes. Lediglich bei Steigerung von 15 auf 20 min^{-1} ist der erreichte Durchsatz auch mit einer erheblichen Steigerung des Betriebsspaltweite zu erklären. Ab 20 min^{-1} nimmt die Betriebsspaltweite bis hin zu 50 min^{-1} nur schwach zu, die Werte bei den einzelnen Drehzahlen schwanken aber sehr. Die Gefahr einer Falschinterpretation ist in diesem Stadium sehr groß.

Für gesicherte Aussagen zum Aufbau eines Gutbettes und seiner Stärke müssen die bereits existierenden Meßwerte durch eine möglichst große Anzahl von Versuchen erweitert werden.

Die Bestimmung der spezifischen Zerkleinerungsleistung erfolgt aus dem Quotienten von Zerkleinerungsleistung und Durchsatz eines jeweiligen Versuches. In der Abbildung 54 ist

die so bestimmte spezifische Zerkleinerungsleistung zum einen mit Einbeziehung der Leerlaufleistung und zum anderen ohne Leerlaufleistung aufgetragen. Da die Leerlaufleistung eine maschinenspezifische Größe ist, die nicht beeinflussbar war, wird

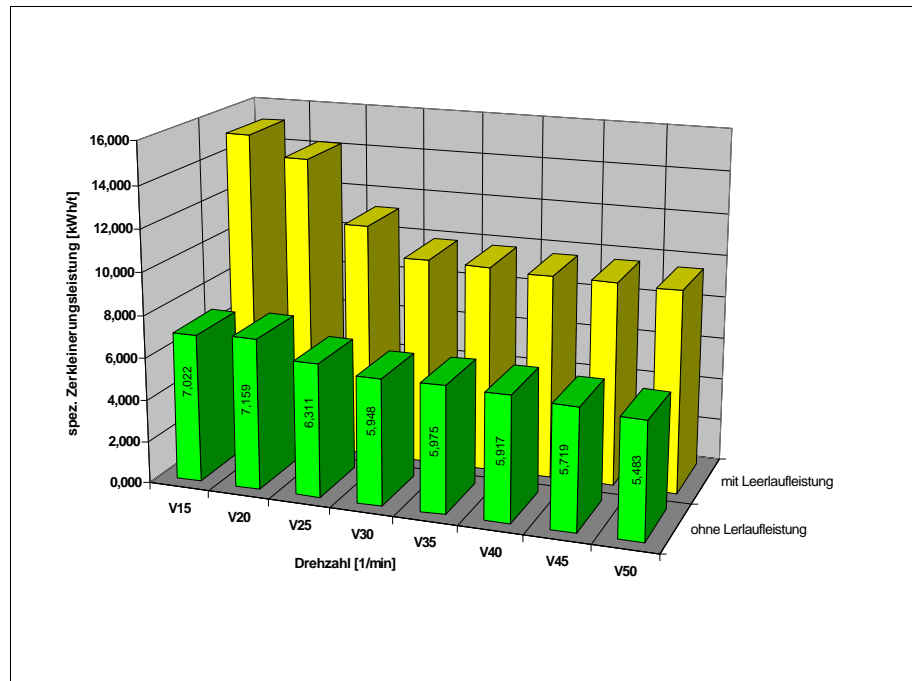


Abb.54: spezifische Zerkleinerungsarbeit (Mittelwert)

der vorderen Datenreihe ein größerer Stellenwert zur Versuchsauswertung beigemessen. Oberflächlich betrachtet ist zu erkennen, daß die spezifische Zerkleinerungsleistung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich in etwa den gleichen Wert aufweist. Die Zerkleinerungsleistung ist also im betrachteten Bereich scheinbar drehzahlunabhängig. Voraussetzung dafür ist, daß der Druck konstant gehalten wird. Nimmt man jedoch die Zahlenwerte der Zerkleinerungsarbeit zu Hilfe, so ist tendenziell ein Absinken in Richtung höherer Geschwindigkeiten auszumachen. Erst ab einer Drehzahl von 30 min^{-1} stellt sich ein nahezu konstanter Wert ein.

5.4.4 Bestimmung der Verschleißintensität

Die Erläuterungen der vorangegangenen Gliederungspunkte 5.4.2 und 5.4.3 zeigen den Verlauf von Verschleiß, Durchsatz und aufgenommener Energie bei Variation der Drehzahl. Sind aber allein die Verschleißdaten untereinander durch die Darstellung der Verschleißraten in g/t bereits vergleichbar? Die Berechnung der Verschleißintensität in mm Abtrag pro Walzenumfangskilometer soll Aufschluß darüber geben. Bisher wurde der Quotient aus gemessenem Verschleiß in Gramm [g] und durchgesetzter Gesamtmenge an Abrasiv in Tonnen [t] bestimmt. Nicht beachtet blieben hingegen der Durchsatz in

Tonnen pro Stunde [t/h] und daraus schlußfolgernd die benötigte Versuchszeit pro Versuch, um die für alle Versuche gleiche Menge von 10 t Material durchzusetzen. Ist dies bekannt, kann auch die Wegstrecke berechnet werden, die ein Punkt auf der Walzenoberfläche insgesamt in dem jeweiligen Versuch zurücklegt. Die anschließende Berechnung des Quotienten aus gemessenem Abtrag in mm und Gesamtwegstrecke in km ergibt die bereits angesprochene Verschleißintensität, die in der Abbildung 55 dargestellt wurde.

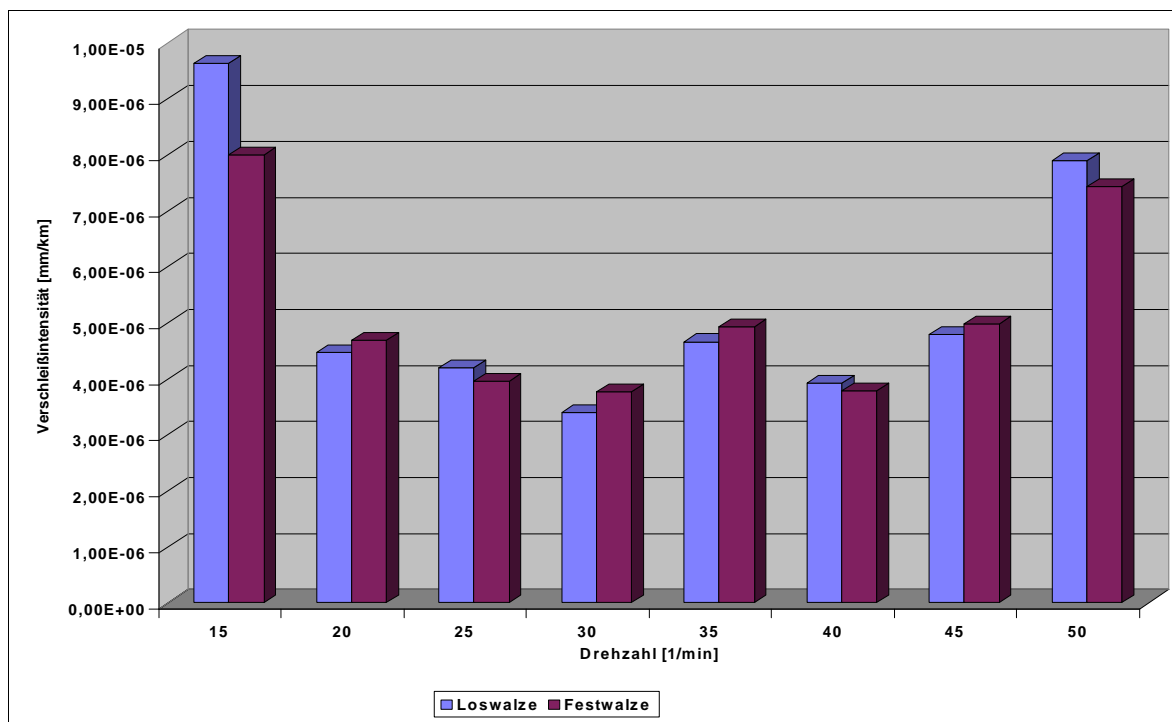


Abb.55: Verschleißintensität

Diese Art soll den wahren Einfluß der Drehzahl auf den Verschleiß verdeutlichen. Vergleicht man die Abbildungen 47 und 55 miteinander, so fällt zunächst einmal keine große Veränderung im Verlauf der Werte über den gesamten Geschwindigkeitsbereich auf. Bei 15 und bei 50 min^{-1} erreicht der Verschleiß Maximalwerte, die sich wesentlich von den Werten der anderen Versuchsreihen unterscheiden. Dagegen weisen die Versuchswerte der Reihen von 20 bis 45 min^{-1} nur geringe Unterschiede auf. Das unterscheidet die beiden Darstellungen voneinander. Während bei der Abb. 47 der höchste Wert sowohl für Fest- als auch für Loswalze fast doppelt so hoch war wie die niedrigsten Werte, unterscheidet die Werte für die Verschleißintensität im genannten Bereich lediglich der Faktor 1,2. Es kann sogar von einem geschwindigkeitsunabhängigen Verschleißverhalten in diesem Bereich gesprochen werden, da sich die höchsten Versuchswerte (20, 35 und 45

min^{-1}) fast überhaupt nicht unterscheiden. In diesem Geschwindigkeitsbereich überwiegt keine der beiden Verschleißarten. Das Verhältnis von Indentation und Abrasion bleibt konstant. Erst eine Drehzahl von 50 min^{-1} führt zu einem spürbaren Verschleißanstieg durch zunehmende Abrasion.

5.4.5 Schlußfolgerungen für die weiteren Versuche

Die Ergebnisse der einführenden Versuche haben gezeigt, daß die Versuchsanlage geeignet ist, aus verfahrenstechnischer Sicht praxisrelevante Tendenzen bestimmen zu können. Dies ist der Ausgangspunkt für die geplanten Hauptversuche zur Untersuchung des Verschleißverhaltens. Dann muß sich zeigen, mit welcher Genauigkeit Verschleißraten bestimmt werden können, die letztendlich einem Vergleich mit Praxiswerten standhalten.

Die einführenden Versuche haben aber auch die Wichtigkeit einer exakten Strategie für die weiteren Versuche unterstrichen, um relevante und vor allem untereinander vergleichbare Ergebnisse zu bekommen. Schon leichte Abweichungen in der Versuchsdurchführung können dazu führen, daß der Versuch und sowohl die aufgezeichneten als auch die gemessenen Werte nutzlos werden.

Mit Hilfe der zahlreichen Meßstellen an der Anlage kann der Versuchsablauf sehr genau und umfangreich analysiert werden.

Die bisher diskutierten Versuchsergebnisse beziehen sich auf die Kombination des Abrasivs Diabas mit dem Verschleißwerkstoff OA600WM. Sie sind nicht allgemeingültig auf andere Abrasive bzw. Verschleißwerkstoffe übertragbar.

Eine Darstellung des Verschleißes in g/t wird als ungünstig eingestuft, da die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gefährdet ist. Nicht alle Einflußfaktoren finden bei der Berechnung in g/t Berücksichtigung. Als günstiger wird die Berechnung der Verschleißintensität angesehen. In dieser Form werden die in den anschließenden Versuchen ermittelten Werte dargestellt.

5.5 Durchführung von Verschleißversuchen mit unterschiedlichen Auftragsschweißwerkstoffen und Abrasiven

Für die Verschleißversuche wurde ein Plan entwickelt, in dem vorerst die praxisrelevanten Paarungen (Abrasiv / Verschleißwerkstoff) verankert waren. Zusätzlich kamen Verschleißversuche aller Verschleißwerkstoffe mit den Referenzabrasiven Diabas und Quarzit als schleißscharfem Stoff dazu. Die Begründung dieser dem Betrachter doch recht straff vorkommenden Versuchsplanung wurden bereits im Gliederungspunkt 5.3 beschrieben. In der folgenden Tabelle werden die verwendeten Auftragschweißwerkstoffe und ihre Zusammensetzung genannt.

	C	Cr	Ti	V	Nb	Mo	Mn	Fe
Vautid 100	5,0	27,0	-	-	-	1,0	-	Rest
Vautid δ	1,8	7,0	5,0	-	-	0,6	2	Rest
OA 600 WM	1,2	4,9	-	0,8	5,6	1,7	1,3	-

Tabelle 3: Auftragschweißwerkstoffe und Legierungsbestandteile [%]

Nachfolgend werden die zum Einsatz kommenden Abrasive vorgestellt. Quelle für die Gesteinsanalyse sind die im Mosaik Verlag München herausgegebenen Werke "Gesteine" und "Mineralien" [66, 67].

Um die Bestandteile der Gesteine hinsichtlich des zu erwartenden Verschleißes charakterisieren zu können, bedarf es unter anderem einer Aussage über die durchschnittliche Härte und, wenn möglich, einer Aussage über das Bruchverhalten.

Für Aussagen über die Mineralhärte wird die Mohshärte genutzt. Die Mohshärte geht auf den deutschen Chemiker Mohs zurück, der diese Einteilung zu Beginn des 19. Jahrhunderts einführte. Er legte eine zehnstufige, willkürlich festgesetzte Härteskala aus einzelnen, zum Teil leicht beschaffbaren Mineralien fest. Zur Bestimmung der Härte eines unbekanntes Kristalls werden selbiges und die festgelegten Probekörper gegenseitig geritzt, d.h. sowohl das Kristall ritzt den oder die Probekörper als auch umgekehrt. Durch diese Methode gelingt es recht schnell, die Härte des unbekanntes Kristalls zu bestimmen. Nachfolgend ist die Härteskala nach MOHS dargestellt.

Härte	Mineralname	Hilfswerkzeug
1	Talk	Fingernagel ritzt leicht
2	Gips	Fingernagel ritzt
3	Calcit	Messerspitze ritzt leicht
4	Fluorit	Messerspitze ritzt
5	Apatit	Messerspitze ritzt schwer
6	Kalifeldspat	Fensterglas ritzt schwer
7	Quarz	Fensterglas wird geritzt Stahl schlägt Funken
8	Topas	
9	Korund	
10	Diamant	

Tabelle 4: Härteskala nach MOHS [66]

Als Indiz für das Bruchverhalten kann man die Spaltbarkeit eines Gesteins bzw. dessen mineralischer Bestandteile heranziehen. Die Spaltbarkeit hängt unmittelbar mit dem inneren geordneten Aufbau der kristallinen Körper zusammen. Diese können die Eigenschaft besitzen, bei Einwirkung von äußeren mechanischen Kräften (Druck, Hammerschläge) entlang bestimmter Richtungen geradlinig spaltbar zu sein. Die Spaltung folgt immer an einfachen Kristallflächen. Die Spaltbarkeit der einzelnen Gesteinsbestandteile kann dabei sehr unterschiedlich sein. Es gibt beispielsweise Minerale, die in verschiedenen Richtungen deutlich unterschiedliche Spaltbarkeit besitzen. Es existieren

aber auch Minerale, die nicht spaltbar sind. Ist ein Mineral nicht spaltbar, so ist die Form der Bruchstücke nicht vorherzusehen. Unter Beanspruchung wird es dadurch vorkommen, daß immer wieder sehr scharfkantige Bruchstücke entstehen, die den Verschleißverlauf natürlich negativ beeinflussen. Das nebenstehende



Abb.56: links: nicht spaltbarer Quarzit mit Kristallflächen und muscheligen Bruch
rechts: Spaltstück des vollkommen spaltbaren Minerals Calcit

Bild 56 zeigt ein spaltbares und ein nicht spaltbares Mineral.

Quarzit

Die Analyse des verwendeten Taunusquarzit hat ergeben, daß SiO_2 mit einem Anteil von 95 Masse-% und als Beimengung Al_2O_3 mit ca. 2,5 Masse-% die Hauptbestandteile des Quarzgesteines sind.

Quarz ist nach den Feldspaten das häufigste Mineral der Erdkruste, das in fast allen Gesteinen mit unterschiedlichem prozentualen Anteil enthalten ist. Quarz hat eine Mohshärte von 7 und ist nicht spaltbar.

Al_2O_3 (Korund) ist gleichfalls nicht spaltbar und hat eine Härte nach Mohs von 9.

Eisenerz

Die Analyse des vorliegenden Eisenerzes (Abbildung 57) aus Mauretaniens zeigte folgende Hauptbestandteile auf:

g Fe_2O_3 mit 73 Masse-%

g SiO_2 mit 24 Masse-%

Die weiteren Bestandteile treten aufgrund ihres geringen prozentualen Anteils in den Hintergrund.



Abb.57: Eisenerz mit Quarzadern

Fe_2O_3 (Hämatit) besitzt eine Mohshärte von 5,5 bis 6,5 und ist nicht spaltbar.

Die Werte für Quarz sind bereits oben genannt.

Kimberlit

Kimberlit (Abbildung 58) ist das Diamant-muttergestein. Vor ca. 70...150 Millionen Jahren wurden die Diamanten aufgrund vulkanischer Tätigkeit an die Erdoberfläche befördert. Das die Diamanten umgebende vulkanische Gestein Kimberlit besitzt einen hohen Anteil an Glimmer (Biotit und Phlogopit) von bis zu 50 %. Glimmergesteine neigen zu hoher Verwitterungsrate. Es

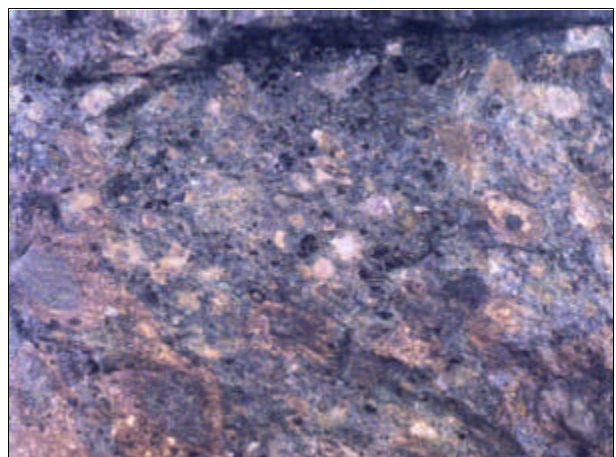


Abb.58: Kimberlit

kommt also mit zunehmender Fördertiefe zu steigender Härte und Festigkeit der Bestandteile.

Biotit und Phlogopit haben beide eine Mohshärte von 2...2,5 und sind äußerst gut und vollkommen spaltbar.

Zementklinker

Der inzwischen weltweit wichtigste Baustoff ist Zement. Portland-Zement enthält neben sauren Oxiden (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) auch das basische Calciumoxid CaO . CaO wird

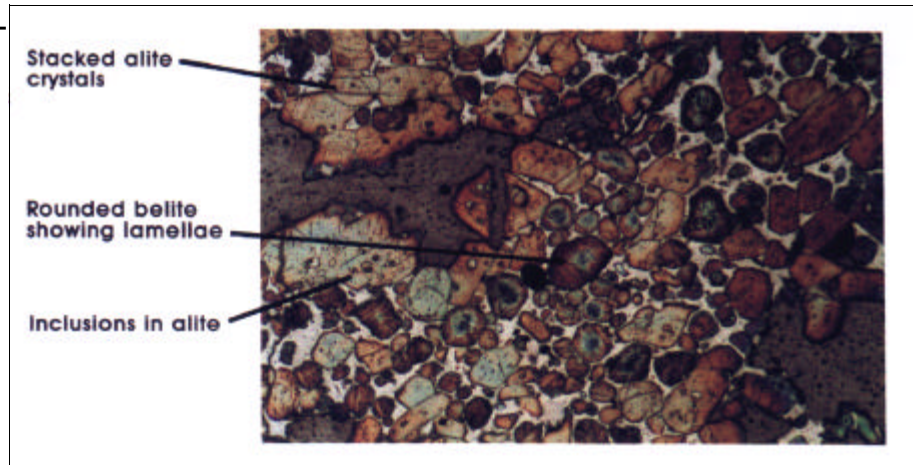


Abb.59: Zementklinker mit Alit und Belit

durch das Brennen von Kalkstein gewonnen. Bei Temperaturen oberhalb 1400°C wird Zementklinker gebildet, welcher vorwiegend aus Tricalcium Silicat ($3\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$), dem sogenannten Alit besteht. Das chemisch reine Tricalcium Silicat ist im Klinker nicht vorhanden, sondern nur in Verbindung mit Fremdoxiden. Die Einbauraten hängen von der Klinkerzusammensetzung, der Brenntemperatur und der sich anschließenden Kühlung ab. Bei einer Temperatur unter 1250°C und sehr langsamer Abkühlung kann Alit zerfallen in CaO und Belit oder Dicalcium Silicat ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$).

Alit ist der wesentliche Bestandteil für die Zementeigenschaften, insbesondere die Festigkeitsentwicklung.

Der genannte Belit ist gleich dem Alit in seiner chemisch reinen Form im Klinker nicht enthalten. Auch hier sind Fremdoxide eingebaut. Belit bildet im Klinker mit hohem Kalkstandard nur vergleichsweise geringe Anteile.

Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird langsamer, je höher der Belit-Anteil ist. Langfristig jedoch erreicht ein solcher Beton die gleichen Festigkeitswerte wie ein Belit-ärmerer Beton.

Belit hat die Eigenschaft, sich bei Raumtemperatur zu modifizieren, was zu einer Volumenvergrößerung um 10 % führen kann. Dies ist der Auslöser für das "Zerrieseln" von

Klinker. Diesem negativen Effekt wird jedoch mit Fremdioneneinbau begegnet. Forschungen zur Abrasivität von Zementklinker, die am Institut für Aufbereitungsmaschinen der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt wurden, haben ergeben, daß der Grad der Abrasivität in starkem Maße vom Gehalt an Belit abhängt. Je größer der prozentuale Anteil an Belit im Klinker ist, umso größer ist der Verschleiß. Schon geringe Änderungen des Belitgehaltes führen zu spürbaren Änderungen des Verschleißverhaltens.

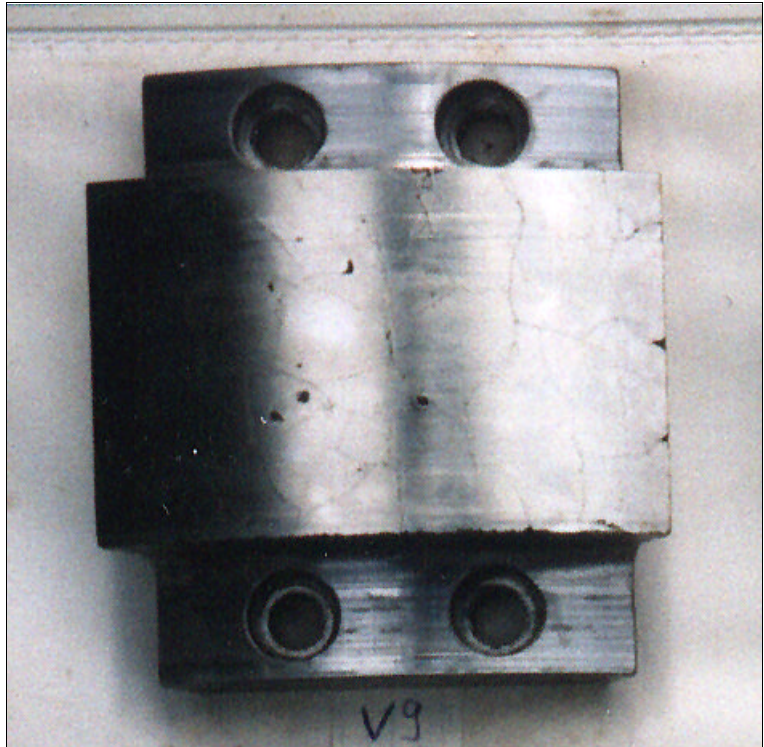
5.5.1 Versuchsplanung

Im Anschluß an die nähere Erläuterung der Verschleißwerkstoffe und der Abrasive wird in der nächsten Tabelle der Versuchsplan für die Versuche mit den geschweißten Verschleißwerkstoffen aufgestellt.

Abrasiv	Verschleißwerkstoff (geschweißt)
Diabas	OA600WM Vautid δ Vautid 100
Zementklinker	OA600WM Vautid δ Vautid 100
Quarzit	OA600WM Vautid δ Vautid 100
Kimberlit	Vautid δ Vautid 100
Eisenerz	Vautid δ Vautid 100

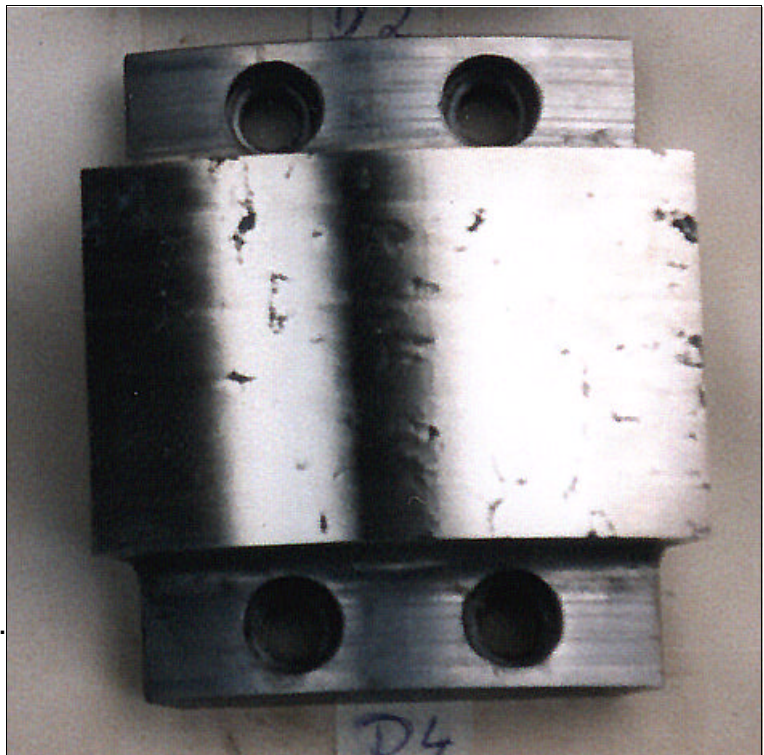
Tabelle 5: Versuchsplan geschweißte Werkstoffe

Vautid 100 besitzt laut Produktpräsentation [68] eine Vickershärte von 750, ist hoch abriebfest, mäßig stoßfest und nur begrenzt rißfest. Die begrenzte Rißfestigkeit ist sehr gut in der Abbildung 60 zu erkennen. Nach der abschließenden schleifenden Behandlung der Segmente sind die entstandenen Härterisse an der Oberfläche zu erkennen. Desweiteren traten bei der Bearbeitung Schwierigkeiten auf, die sich



auch im Bild 60 widerspiegeln. Es kam zu Abplatzungen im Randbereich.

Vautid δ [68] hingegen ist etwas weicher mit 650 HV, schweißhart, stoßfest und abriebfest. Das nebenstehende Bild 61 zeigt die bei diesem Werkstoff aufgetretenen Mängel. Nach der abschließenden Bearbeitung kamen zahlreiche kleine und größere Lunker zum Vorschein. Inwieweit sich diese visuell erkennbaren Mängel auf die Versuchsergebnisse auswirken



werden, bleibt abzuwarten.

Für den Auftragschweißwerkstoff OA600WM können leider keine Ausgangsbilder vor-

gestellt werden. Die Segmente aus OA600WM verfügten über eine vollkommen glatte Oberfläche, frei von jeglichen Lunkern und Rissen. Erkennbar waren allerdings die Stöße, die entstehen, wenn sich die gezogenen Schweißnähte "treffen".

In Bezug auf die Härte liegt der Werkstoff in etwa mittig zwischen den beiden genannten Vautid - Werkstoffen.

5.5.2 Segmentaussehen nach den Versuchen

Die visuelle Bewertung der verschlissenen Segmente sei hier bewußt vor die Auswertung der Meßergebnisse gestellt, da die so gewonnenen Erkenntnisse zur Deutung der Versuchsergebnisse herangezogen werden.

Wie in der Abbildung 62 zu sehen ist, sind die zu Beginn der Versuche erkannten Härterisse beim Vautid 100 durch die angreifenden Abrasive ausgewaschen worden. Zu erwähnen ist, daß sich das Aussehen der Oberflächen während der Versuche nicht geändert hat, was heißen soll, daß die Härterisse wahrscheinlich bis auf den Grundkörper reichen. Es kam nicht zu Kantenausbrüchen.

Betrachtet man das Bild 63, so ist sehr deutlich zu erkennen, wie enorm sich die Schweißfehler auf die Gestaltung der verschlissenen Oberfläche ausgewirkt haben. Die Nummerierungen unter dem jeweiligen Segment belegen, daß es

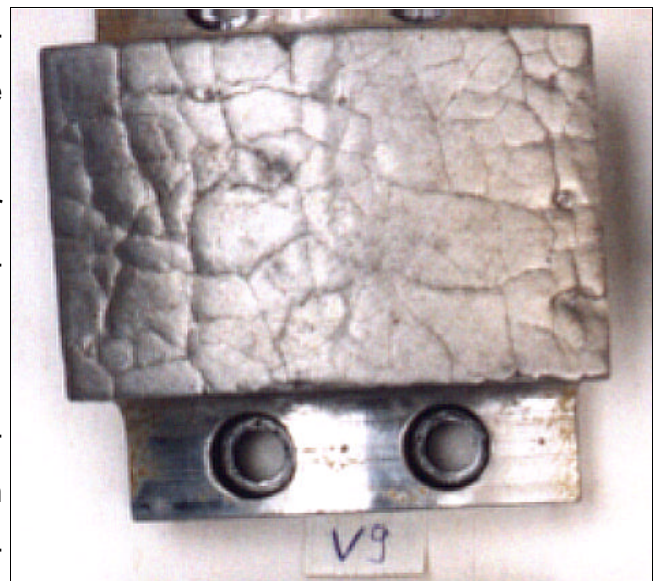


Abb.62: Segment mit Vautid 100 nach den Versuchen

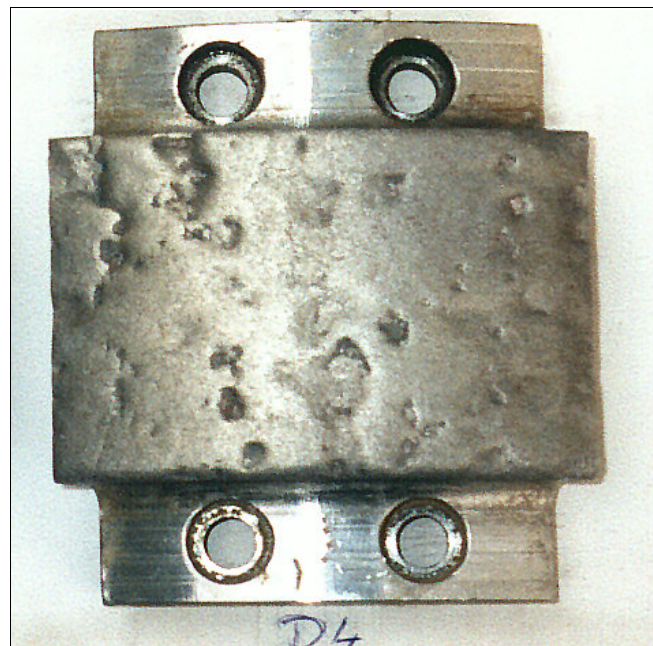


Abb.63: Walzensegment mit Vautid δ nach den Versuchen

sich in den Bildern 61 und 63 um die gleichen Segmente handelt. Die im Bild 61 erkennbaren, relativ kleinen Lunker waren die Ursache für die Entstehung der im Bild 63 dargestellten Segmentoberflächen. Bei dem Vergleich der zwei genannten Bilder 61 und 63 wird klar, daß auch diese Ausgangsfehler nicht nur an der Oberfläche waren, sondern sich vermutlich gleichfalls bis zum Grundkörper hindurch fortgesetzt haben.

Für den Werkstoff OA600WM muß eine ausführlichere Betrachtung durchgeführt werden. Die ursprünglich fast spiegelglatte Oberfläche wurde durch die Versuche so beansprucht, daß nicht vorhersehbare "Defekte" eintraten. Wie in der Abbil-

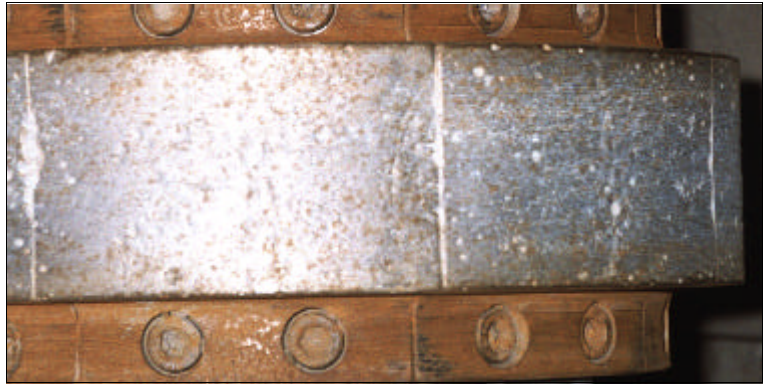


Abb.64: Kantenausbruch links und Peeling

dung 64 zu sehen ist, kam es bei diesem Werkstoff unter Beanspruchung zum Kantenausbruch und zu einer Art des Peeling, wie es unter Punkt 4.2.1 "Verschleißmechanismen" vorgestellt wurde. Aus der Oberfläche wurden kreisrunde Bereiche herausgelöst. Die Tiefe der so entstandenen Löcher betrug durchschnittlich 2 mm. In dem nun folgenden Bild 65 wird ein weiteres Beispiel des Kantenausbruchs dargestellt, hier allerdings etwas anders als auf dem vorigen Bild zu sehen war. Fast über die ganze Breite des Segmen-

tes ist die anfangs scharfe Kante abgebrochen und hinterläßt eine Art Phase. Dieses Ergebnis war ausschlaggebend dafür, daß die nächsten zu fertigenden Segmente von vornherein mit einer Phase an den Stoßseiten versehen werden. Der sehr harte und spröde Werkstoff war den in diesen Bereichen des Segmentes herrschenden Höchstbelastungen in einer sol-

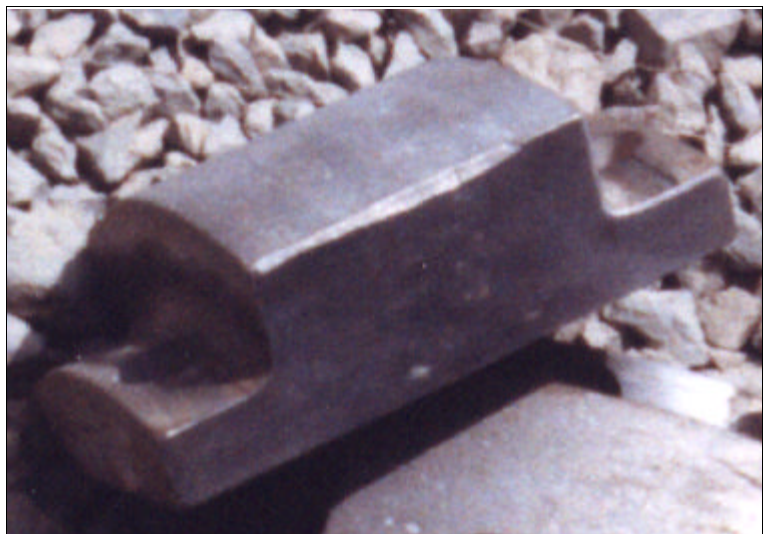


Abb.65: Kantenausbruch bei einem Walzensegment mit OA600WM

chen konstruktiven Ausfertigung nicht gewachsen.

Das Bild 66 offenbart eine nächste Reaktion des Werkstoffes auf die extremen Belastungen während des Betriebes der Anlage. Man kann erkennen, daß sich ein sichelförmiger Riß auf dem rechten Segment über die gesamte Breite erstreckt. Bei dem linken Segment ist ein solcher Riß in den Anfängen zu sehen. Die Notizen des Verfassers beschreiben den Riß noch etwas deutlicher als auf diesem



Bild zu erkennen ist. Es handelt **Abb.66:** sichelförmiger Riß über die gesamte Segmentbreite sich hier um einen bereits bis auf den Grundkörper reichenden Riß, dessen Breite (Rißufer zu Rißufer) an der Segmentoberfläche größer ist als im Bereich des Grundkörpers. Man kann also darauf schließen, daß sich der Bereich vom Riß bis zur Stoßkante der Segmente in Richtung selbiger bewegt.

Bei der Betrachtung des Segmentes im Zentrum der Abbildung 67 ist deutlich ein ausgewaschener Randbereich des Segmentes zu erkennen. Bei näherer Betrachtung konnte auch die Ursache gedeutet werden. Die Auswaschung erfolgte aufgrund eines Verbindungsfehlers unter den einzelnen **Abb.67:** Auswaschung im Randbereich eines Segmentes mit Schweißraupen.



Im Bild 68 ist gleichfalls eine Auswaschung zu erkennen, die hier aber quer zur Rotations-

richtung entstand. Die Ursache hierfür wurde im vorstehenden Text bei der Beschreibung der Segmente im Ausgangszustand bereits genannt. Es handelt sich dabei um die bereits im Ausgangszustand erkennbaren Stöße der einzelnen Schweißraupen. Die Auftragschweißung erfolgte in Umfangsrichtung. Anfangs- und Endpunkt der Schweißraupen sind im Bild 68 als diese Auswaschung verdeutlicht.

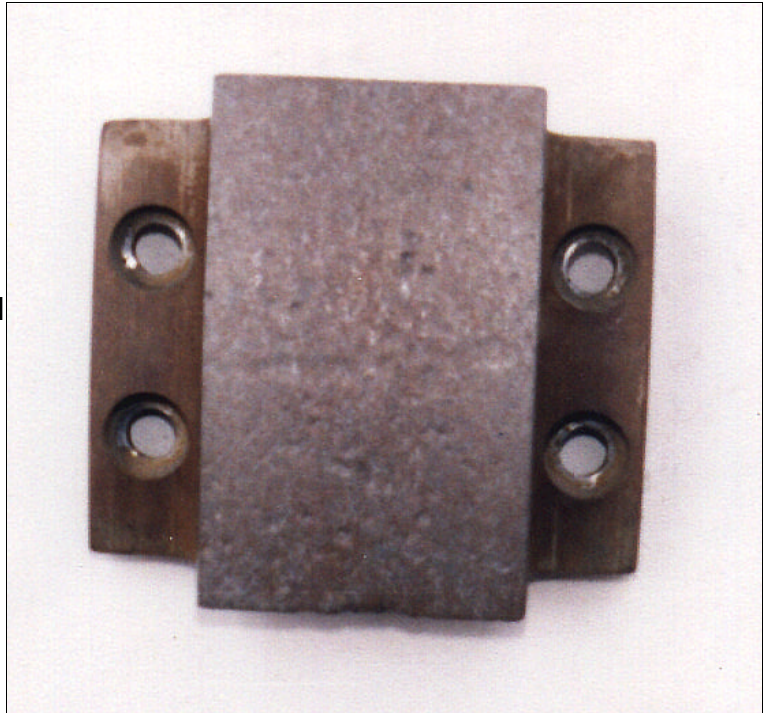
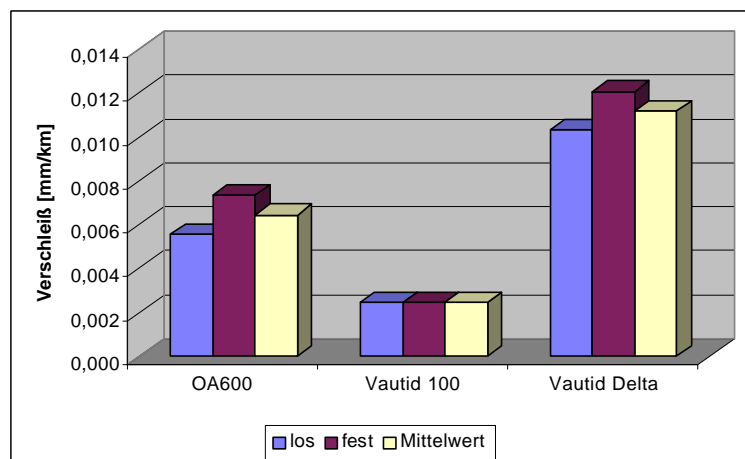


Abb.68: Auswaschung quer zur Rotationsrichtung bei OA600WM

5.5.3 Versuchsergebnisse

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, Versuchsergebnisse miteinander zu vergleichen. Ausschlaggebend für die Wahl der geeigneten Methode ist die Frage danach, welche Thematik vordergründig dargestellt werden soll. Der Verfasser hat sich bei der nun folgenden Darstellung der Versuchsergebnisse entschieden, die Werte für die verschiedenen Auftragschweißwerkstoffe immer in Bezug auf ein Abrasiv zu diskutieren.

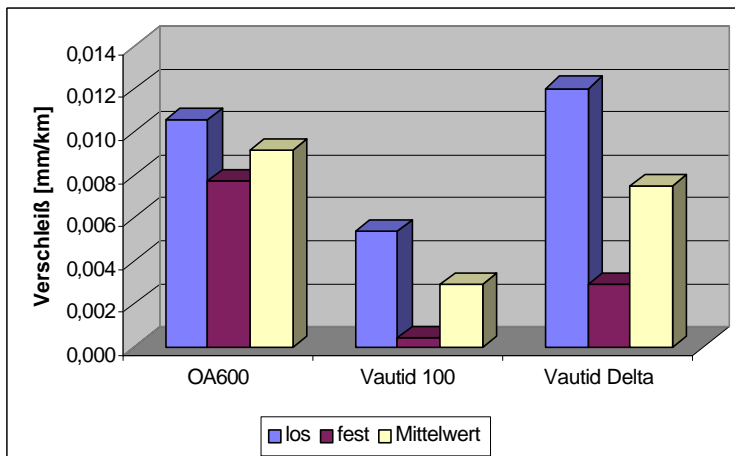


Im Bild 69 sind die Verschleißwerte der drei getesteten Werkstoffe dargestellt, die nach dem Versuch mit Diabas gemessen wurden. Es ist nochmals darauf hinzuweisen, daß die für die geschweißten Werkstoffe dargestellten Verschleißwerte mittels Wägung ermittelt wurden. Durch Kennt-

nis der jeweiligen Dichten und der Abmessungen der Segmente wurde der Verschleißbetrag auf die dimensionslose Größe der Verschleißintensität umgerechnet.

Betrachtet man das Bild 69, so ist zu erkennen, daß der Werkstoff Vautid δ in etwa doppelt so hohe Verschleißwerte aufweist wie OA600WM. Im Vergleich mit Vautid 100 betragen sie sogar das Vierfache.

Diese Rangfolge relativiert sich aber von Versuch zu Versuch



bzw. von Abrasiv zu Abrasiv. **Abb.70:** Verschleißwerte für die Versuche mit Klinker

Die weitere Darstellung der Versuchswerte wird diese Bemerkung untermauern. Vergleicht man nun die Ergebnisse aus dem Bild 69 mit den Ergebnissen im Bild 70, so sieht man, daß hier eine andere Reihenfolge eingetreten ist. Bei den Versuchen mit Klinker erwies sich OA600 WM als der schwächste Werkstoff. Bester Werkstoff auch hier Vautid 100. Gleichfalls ist zu erkennen, daß zwischen Fest- und Loswalze mitunter große Differenzen herrschen. Zu erklären ist dies mit der Korngrößenzusammensetzung des Abrasivs. Beim Klinker lag ein sehr breites Kornband vor, d.h. von 0 bis 32 mm mit einem relativ großen Anteil an Grobkorn. Dies führte zum "Rattern" der Maschine, wie es unter Punkt 4.1 bereits beschrieben wurde. Das Schlagen der Loswalze bewirkte diesen dargestellten erhöhten Verschleiß. Die größere Schlagempfindlichkeit des Vautid 100 wird mit diesem Ergebnis bestätigt. Es ist nicht auszuschließen, daß es zu Mikrobrüchen infolge der Schlagbeanspruchung gekommen ist, die sich im Verlauf des Versuches mit dem Auswaschen der Härterisse überdeckten und nicht erkannt wurden. Auch bei Vautid δ ist für die Loswalze ein wesentlich höherer Verschleiß aufgetragen als für die Festwalze. Dies kann gleichfalls mit der Schlagbeanspruchung erklärt werden, der die Loswalze ausgesetzt war. Hier allerdings nicht mit der Begründung der Schlagempfindlichkeit, sondern Hauptgrund wird bei Vautid δ die fehlerhafte Verarbeitung sein, die in den Bildern 61 und 63 anschaulich verdeutlicht wurde.

Die Versuche für Vautid wurden mit 4 Segmenten Vautid 100 auf Los- und Festwalze und

4 Segmenten Vautid δ auf Los- und Festwalze (also gemischt) durchgeführt. Diese Art der Aufteilung wurde gewählt, weil einerseits nur 8 Segmente pro Werkstoff zur Verfügung standen und andererseits gewährleistet werden sollte, daß sich im Versuch gleiche Werkstoffe gegenüberstehen.

In der Abbildung 71 sind die ermittelten Verschleißwerte für die Versuche mit Quarzit dargestellt. Bei der Betrachtung

ist darauf zu achten, daß aufgrund der besseren Anschaulichkeit die z-Achse im Gegensatz zu den vorhergehenden Versuchen auf 0,350 vergrößert wurde. Man erkennt die Auswirkung eines sehr engen Kornbandes auf das Verschleißverhalten von Los- und Festwalze.

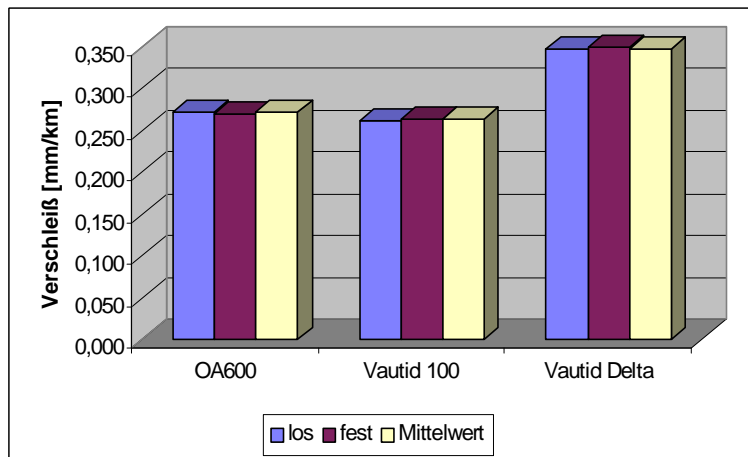


Abb.71: Verschleißwerte für die Versuche mit Quarzit

Nahezu identische Werte wurden bei beiden Walzen bestimmt. Und das nächste Phänomen ist, daß der bei den vorhergehenden Beispielen dominierende Werkstoff Vautid 100 fast exakt die gleichen Verschleißwerte bringt wie OA600WM. Erklärbar ist dies damit, daß Vautid 100 trotz größerer Härte mehr Fehlstellen in der Oberfläche aufweist als OA600WM. Und diese Fehlstellen sind, wie bereits erwähnt, Schwachstellen beim Verschleißverhalten. OA600WM hingegen behält auch bei dem Versuch mit Quarzit seine nahezu glatte Oberfläche und bietet dem ständig scharfen Quarzkorn nur wenige Angriffsstellen. Vautid δ ist aufgrund seiner geringeren Härte und der vielen Lunker in dieser Versuchsreihe der schwächste Werkstoff.

Auch die in Abbildung 72 dargestellten Werte für die Versu-

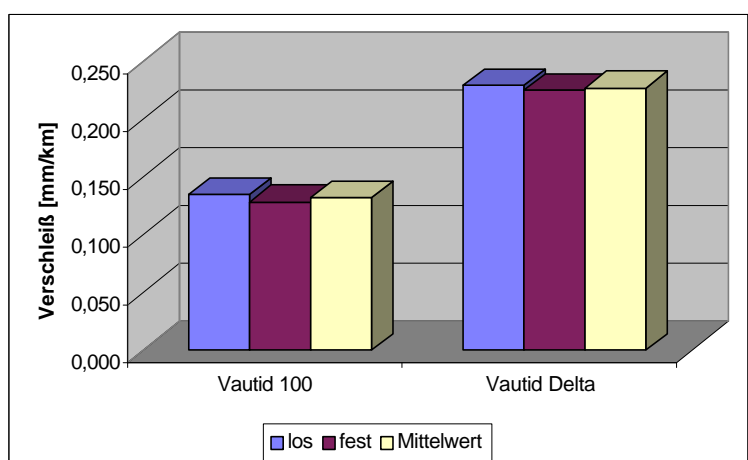


Abb.72: Verschleißwerte für die Versuche mit Kimberlit

che mit dem Diamantmuttergestein Kimberlit bestätigen erneut die Aussage, daß sich ein enges Aufgabekornband positiv auf einen gleichmäßigen Verschleiß von Los- und Festwalze auswirkt. Das vorliegende Abrasiv hatte eine Korngröße von 2 bis 10 mm. Aufgrund der relativ geringen Menge an zur

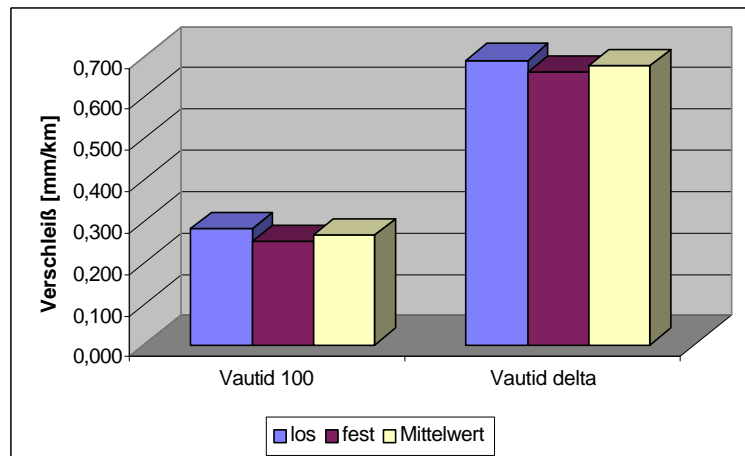


Abb.73: Verschleißwerte für die Versuche mit Eisenerz

Verfügung stehendem Material - die Beschaffung gestaltete sich schwierig und die Transportkosten des Materials von Australien nach Deutschland waren enorm hoch - wurde auf einen Versuch mit OA600WM verzichtet. Es kamen lediglich die beiden Vautid-Versionen zum Einsatz. Bei Betrachtung der aufgetragenen Werte ist auch hier wieder festzustellen, daß Vautid 100 den besseren Verschleißschutz liefert. Dieser Werkstoff weist in etwa halb so hohe Verschleißwerte auf wie Vautid δ .

Als letztes Abrasiv wurde Eisenerz aus Mauretaniens getestet. Die ermittelten Verschleißwerte sind in Abbildung 73 dargestellt. Das Eisenerz wurde mit einer Korngrößenverteilung von 0 bis 50 mm geliefert. Am Forschungsinstitut für Aufbereitung in Freiberg wurde es auf eine maximale Korngröße von 15 mm vorzerkleinert, ehe es auf der Versuchsapparatur zum Einsatz kam. Auch in diesen Versuchsergebnissen spiegelt sich der Einfluß der Körnung wider. Das vorzerkleinerte Gut wies ein enges Kornband auf. Vautid 100 erreicht 2,5 mal geringere Verschleißraten als Vautid δ . Die Höhe des Verschleißes ist nicht verblüffend, wenn man an dieser Stelle an die Ausführungen zur Zusammensetzung eines Eisenerzes denkt. Zusätzlich zu dem abrasiven, nicht spaltbaren Quarz wirkt auch der ebenfalls sehr harte, nicht spaltbare Hämatit.

5.5.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der auftragsgeschweißten Werkstoffe

Schlüsselt man die Versuchsdaten in der Art und Weise auf, daß alle Verschleißwerk-

stoffe jeweils einem Abrasiv gegenübergestellt werden, so kommt man zu der Erkenntnis, daß ein Werkstoff, der bei einem Abrasiv die geringsten Verschleißwerte liefert, nicht zwangsläufig bei einem anderen Abrasiv wieder solche guten Ergebnisse erreichen muß. Die enorme Härte eines Werkstoffes (Vautid 100) wandelt sich leicht in einen Nachteil um, wenn einerseits in der Fertigung schon Schwierigkeiten auftreten, die Schweißung rißfrei zu gestalten (Schwachstellen) und andererseits die Druckbelastung noch durch Schlagbeanspruchungen überlagert wird.

Gleichfalls hat sich gezeigt, daß eine fehlerhafte Auftragschweißung verheerende Folgen auf den Verschleißverlauf haben kann. Bestes Beispiel dafür ist der Werkstoff Vautid δ . Die anfänglich kleinen bis mittelgroßen Lunker waren die Ursache für derartig gewaltige Auswaschungen. Das Ergebnis wurde mit den um ein Vielfaches höheren Werten gegenüber den beiden anderen Werkstoffen anschaulich dargestellt.

All diese Fakten lassen den Schluß zu, daß man nicht allein mit enorm harten Verschleißoberflächen zum Erfolg bei der Bekämpfung des Verschleißes kommt, sondern daß man mit einer Mischung aus weichem Werkstoff mit Einlagerungen von beispielsweise harten Karbiden bessere Werte erzielen kann. Diese Idee wurde schon ansatzweise, wie geschildert, bei dem Werkstoff Vautid 100 verwirklicht. Jedoch entstehen Schwierigkeiten, den Werkstoff mittels Schweißung rißfrei auf den Grundwerkstoff aufzubringen.

5.6 Entwicklung von Hexadur® [69]

Die oben genannten Schwierigkeiten waren auch der Maschinenfabrik Köppern in Hattingen bekannt. Durch werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen und Forschungen von Herrn Dr. Theisen und seinen Mitarbeitern kam man zu der Auffassung, daß es möglich sein muß, einen Verschleißwerkstoff zu entwickeln, der in einer Matrix fein verteilte, in der Korngröße festlegbare Hartphasen enthält. Aus oben genannten Gründen scheidet eine Schweißversion aus, so daß ein anderer Weg gesucht und gefunden werden mußte. Man entschloß sich, pulvermetallurgische Methoden zu nutzen, mit denen es möglich ist, Gemische von Hartstoff-Metallpulvern, sogenannte Hartverbundwerkstoffe, mit Hartphasengehalten von 50 Vol.-% und darüber in rißfreien Schichten herzustellen. Damit sollte es möglich sein, die Hartphasengröße und ihre Verteilung einzustellen. Es entstand

eine Hexadur®-Oberfläche.

Die Beanspruchungsflächen der Walzen werden mit einer sehr harten verschleißbeständigen Oberfläche beschichtet. Diese Oberfläche besteht aus zwei verschiedenen Werkstoffen, die im Zusammenwirken eine gewisse Struktur bilden. Ein hochverschleißfester Werkstoff wird großflächig aufgebracht. Dieser ist von Zwischenräumen umgeben, die mit einem angepaßten Werkstoff mit geringerer Verschleißbeständigkeit ausgefüllt werden. Die Entscheidung für zwei Werkstoffe hat Gründe, die in der Verfahrenstechnik zu suchen sind. Eine Profilierung von Walzen dient zur Verbesserung der Einzugsbedingungen und dadurch des Durchsatzverhaltens der Maschine. Aufgrund des niedrigeren Verschleißwiderstandes des Werkstoffes in den Zwischenräumen verschleißt dieser bei Beanspruchung schneller. Es kommt also während des Betriebes zu einer Einstellung eines Profils auf den Walzen.

Als erste Hexadur®-Oberfläche wurde das sogenannte WT1 entwickelt. WT1 kam parallel in der Praxis und auf der Versuchsanlage der TU Bergakademie Freiberg zum Einsatz.

Erste Ergebnisse und daraus resultierende Erkenntnisse, die im Anschluß noch ausführlicher diskutiert werden, gaben den Anlaß dafür, eine weitere Hexadur®-Oberfläche zu entwickeln, das sogenannte WT2.

Der Aufbau des WT1 ist folgendermaßen:

Eine Dispersion feiner Hartphasen ($< 2 \mu\text{m}$) des Typs M_7C_3 ist in einer gehärteten Fe-Matrix eingebettet.

WT2 ist wie folgt aufgebaut:

Zusätzlich zu den feinen - Hartphasen des WT1 gelangen grobe Hartphasen ($159 \mu\text{m}$) des



Abb.74: Verschleißoberfläche aus Hexadur®-WT1

Typs MC mit einer Mikrohärte von > 2000 HV in die Dispersion, die in einer gehärteten Fe-Matrix eingebettet ist.

Ein Beispiel einer solch gestalteten Oberfläche findet man in der Abbildung 74.

Hier ist zu sehen, wie die Zwischenräume zwischen den verschleißfesteren großflächigen Fliesen infolge des schnelleren Verschleißes herausgearbeitet

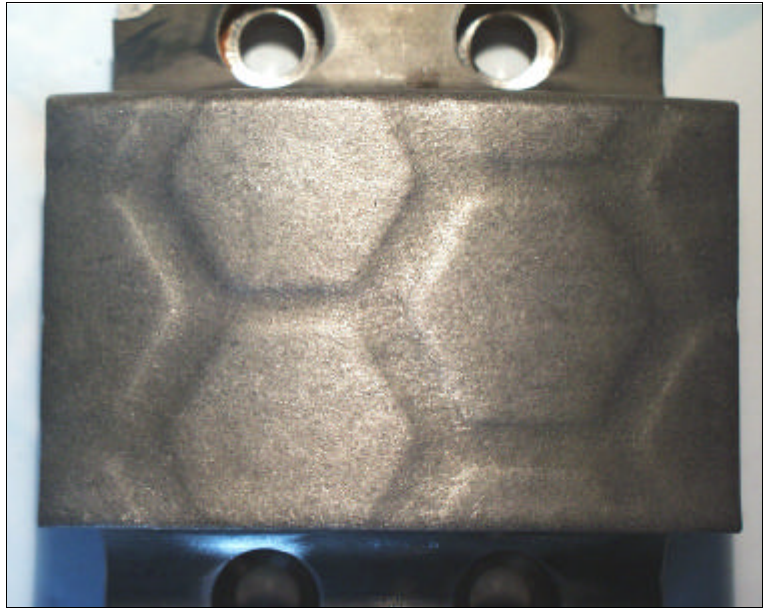


Abb.75: WT1 - Segment

sind und sich dort das zu zerkleinernde Gut festsetzt. Dies führt zu der bereits erwähnten Verbesserung der Einzugsbedingungen, was gerade für sehr leichtes Aufgabegut von besonderer Bedeutung ist. Die Zwischenräume sind bereits nach einer kurzen Zeit der Einlaufphase so verschlissen, wie man es im Bild 75 sehen kann.

5.6.1 Versuchsdurchführung mit Hexadur® - WT1 und WT2

5.6.1.1 Änderung der Verschleißmessung

Die bisherigen Versuche wurden mit auftraggeschweißten Verschleißschutzwerkstoffen durchgeführt, bei denen eine Verschleißmessung mittels Wägung ohne Probleme durchführbar ist. Jetzt stand man aber vor dem Problem, daß sich auf der Walzenoberfläche zwei Werkstoffe befanden, die zudem auch noch unterschiedliche Dichten aufwiesen. Also schied eine Messung des Gewichtsverlustes aus. Ein weiterer, angesichts des erstgenannten, nicht so gravierender Grund war der, daß von den verantwortlichen Werkstoffwissenschaftlern eine Verschleißrate prognostiziert wurde, die sehr gering ist.

Das heißt, der Versuchsaufwand würde um ein Vielfaches größer werden, wenn man ein mit einer Waage meßbares Ergebnis erhalten will.

Die einzige Möglichkeit der Verschleißmessung sah man letztendlich in der Messung des Höhenabtrages von Versuch zu Versuch, beginnend bei einer Nullmessung. Unterstützung bei der Realisierung dieser Aufgabe fand der Verfasser am Institut für Maschinenelemente der TU Bergakademie Freiberg. Dort befindet sich ein Drei-Koordinaten-Meßgerät, mit dessen Hilfe es möglich sein sollte, die gestellte Aufgabe zu erfüllen.

Die Kompliziertheit der Aufgabe soll durch folgende Bemerkungen untermauert werden.

1. Es sollen lediglich die verschleißfesten Fliesen ausgemessen werden, nicht die Zwischenräume.
2. Nicht nur komplette Fliesen, sondern auch die Teilstücken der Fliesen sollen ausgemessen werden.
3. Keines der Segmente ist gleich einem anderen Segment. Es kam fertigungsbedingt zu einer Verschiebung der Fliesen auf der Oberfläche, so daß sie nicht, wie geplant, hundertprozentig exakt ausgerichtet waren.
4. Jedes der Segmente benötigt ein eigenes Bezugskordinatensystem, mit dessen Hilfe es erst möglich wird, die von Versuch zu Versuch gemessenen Daten für ein Segment zu vergleichen.

Es stand die Aufgabe, die Segmente nach jedem Versuch gründlich gereinigt auf einer speziell für diesen Zweck gebauten Grundplatte aufzuschrauben und auszumessen. Die Befestigung der Segmente sieht man im nebenstehenden Bild 76.

Das Bezugskordinatensystem wurde durch Ausmessen einer der 4 Durchgangsbohrungen (Abbildung 78), einer der Sei-



Abb.76: Für die Messung aufgeschraubte Segmente

tenflächen des Segments und einer speziell für diese Messungen angebrachten waagerechten Fläche ermittelt. Dieses Bezugskordinatensystem wurde vor jeder Messung erneut ermittelt.

Nach Abschluß dieser Vorbereitungsarbeiten konnte die eigentliche Messung durchgeführt werden. Jede Fliese jedes Segments, auch der kleinste Fliesenteil, wurde einzeln abgetastet. In der Abbildung 77 kann man den Meßtaster beim Ausmessen einer der Segmentfliesen erkennen. Die Meßdaten wurden rechentechnisch erfaßt und konnten so mit den geeigneten Programmen weiterverarbeitet werden. Das Messen des Höhenabtrages hatte den Vorteil, daß es nun auch möglich war, ein Oberflächenprofil jedes einzelnen Segments zu erzeugen.

Durch diese Möglichkeit kann der Verschleißfortschritt von Versuch zu Versuch visuell mit Hilfe einer Computer-Animation deutlich gemacht werden.

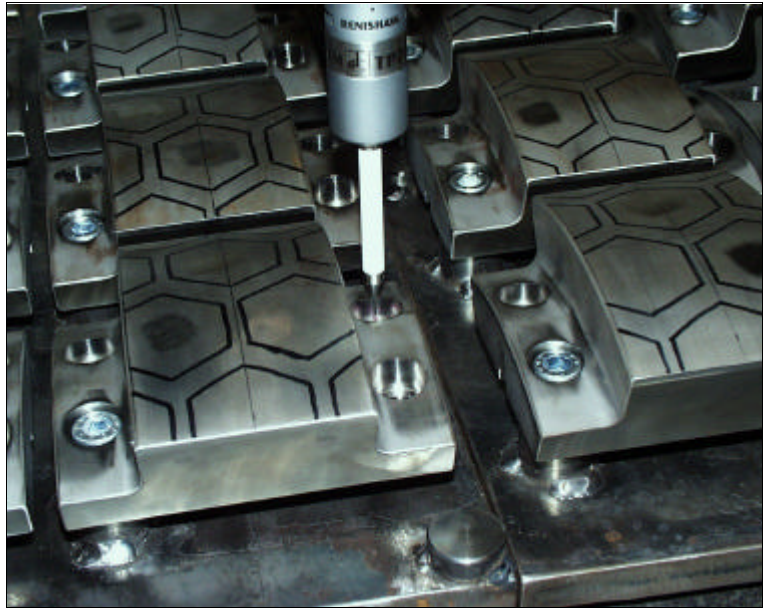


Abb.78: Ausmessen einer Bohrung



Abb.77: Meßtaster beim Ausmessen einer Segmentfliese

5.6.1.2 Verschleißergebnisse von WT1 und WT2

Auch für WT1 und WT2 wurde eine Versuchsplanung aufgestellt, die im Wesentlichen der der auftraggeschweißten Werkstoffe ähnelt.

So wurde WT1 mit den Abrasiven Diabas, Klinker, Quarzit, Kimberlit und Eisenerz getestet. WT2 kam mit Klinker, Quarzit, Kimberlit und Eisenerz zum Einsatz.

In der Abbildung 79 ist deutlich zu sehen, daß die neuentwickelte Verschleißoberfläche WT1 bei den Versuchen mit Diabas wesentlich bessere Verschleißwerte aufweist als alle anderen drei getesteten Auftragschweißungen. So hat Vautid 100 die dreifache Verschleißrate erbracht. Die beiden anderen

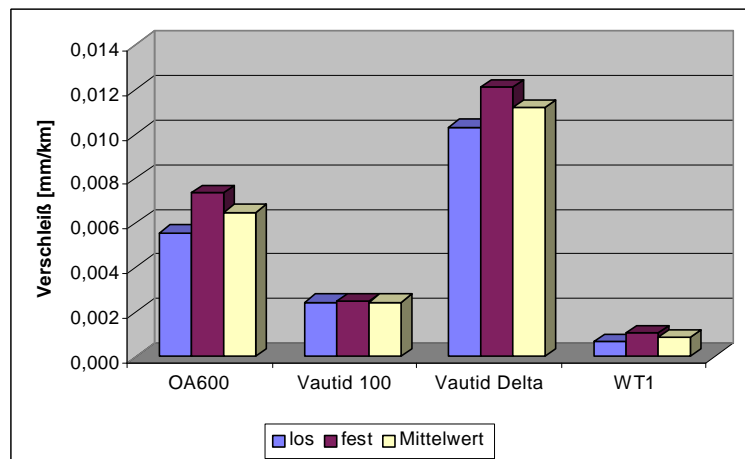


Abb.79: Verschleißwerte für die Versuche mit Diabas

Werkstoffe liegen mit ihren Werten wesentlich über denen von WT1. Auch bei WT 1 sind relativ geringe Unterschiede zwischen den Verschleißraten der Los- und der Festwalze zu erkennen.

Das Bild 80 zeigt die Richtigkeit der im Text getätigten Feststellung, daß ein Verschleißwerkstoff nicht zwingend bei allen Abrasiven die besten Ergebnisse liefern muß, wenn er bei einem Abrasiv sehr gute Werte hat. Betrachtet man den Mittelwert von WT1 mit denen der drei Auftragschweißungen, so

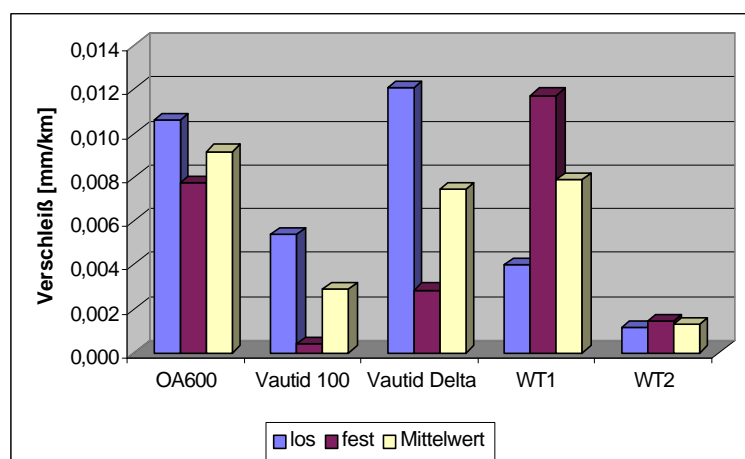


Abb.80: Verschleißwerte für die Versuche mit Klinker

ist zu erkennen, daß Vautid δ in etwa die selben Ergebnisse liefert. Lediglich OA600WM liegt noch darüber. Dieser Effekt war einer der ausschlaggebenden Punkte, die

Hexadur®-Oberfläche weiterentwickeln. Es wurde offensichtlich, daß die eingebetteten kleinen Hartphasen den abrasiv wirkenden großen Mineralkörnern keine Gegenwehr entgegenbringen können und mit dem Matrixwerkstoff abgetragen werden. Der Forderung nach zusätzlichen größeren Hartphasen

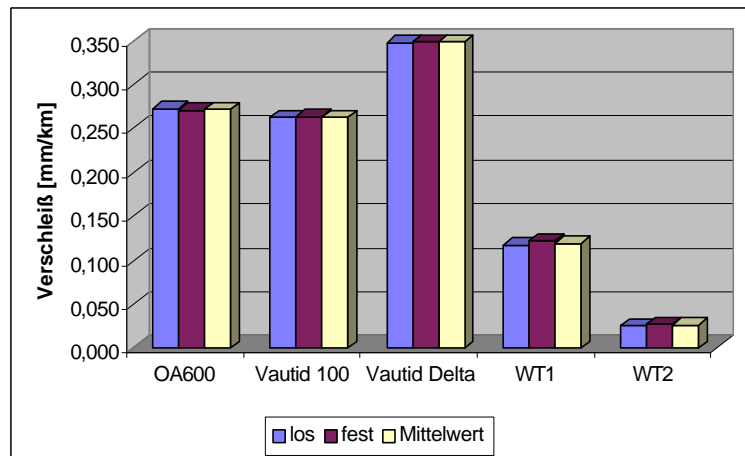


Abb.81: Verschleißwerte für die Versuche mit Quarzit

folgte die Entwicklung des WT2. Beim Versuch mit Klinker zeigt WT2 die besten Verschleißwerte. Zu beachten ist, daß das große Kornband keinen gravierenden Einfluß auf das Verschleißverhalten des Werkstoffs hat. Los- und Festwalze haben ähnliche, sehr geringe Werte. Die Versuche mit Quarzit (Abbildung 81) zeigen anschaulich das bessere Verschleißverhalten beider Hexadur®-Varianten. Sowohl WT1 als auch WT2 weisen wesentlich geringere Verschleißwerte auf als die Auftragschweißungen. So erbrachte der Versuch mit WT1 einen um die Hälfte besseren Verschleißbetrag als beispielsweise Vautid 100. WT2 hingegen war noch einmal um das 5fache besser als WT1.

In der Abbildung 82 werden die schon getätigten Aussagen bestätigt. Zum einen ist der Werkstoff WT1 nicht wesentlich besser als der Werkstoff Vautid 100, in dem bekanntlich auch Hartphasen enthalten sind.

WT2 hingegen ist auch hier der mit Abstand beste Werkstoff. Er erlangte die 20fach besseren

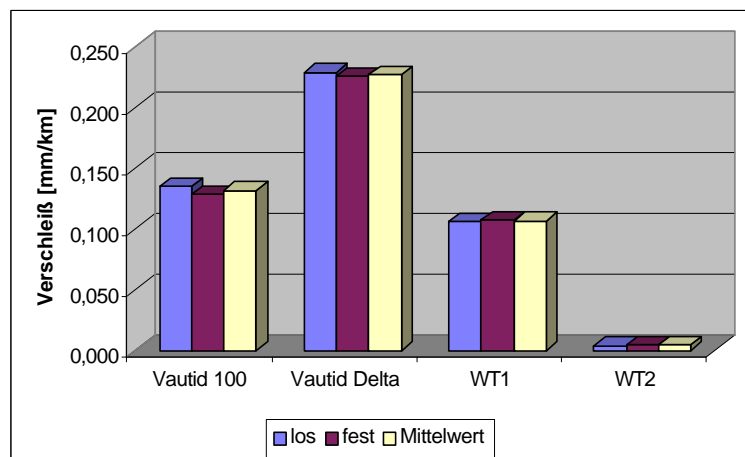


Abb.82: Verschleißwerte für die Versuche mit Kimberlit

Verschleißwerte als WT1. Die Kombination von groben und feinen Hartphasen in einer gehärteten Matrix ergeben offensichtlich den besten Verschleißschutz. Dies wird auch durch die Werte in der Abbildung 83 bestätigt. Selbst bei den Versuchen mit dem sehr

harten Eisenerz wurden bei WT2 Werte gemessen, die um das zehnfache besser sind als bei WT1. WT1 hingegen liegt in etwa auf dem Niveau von Vautid 100.

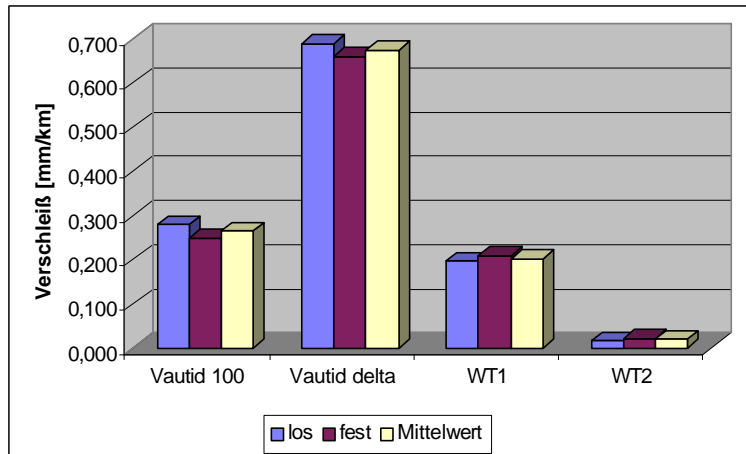


Abb.83: Verschleißwerte für die Versuche mit Eisenerz

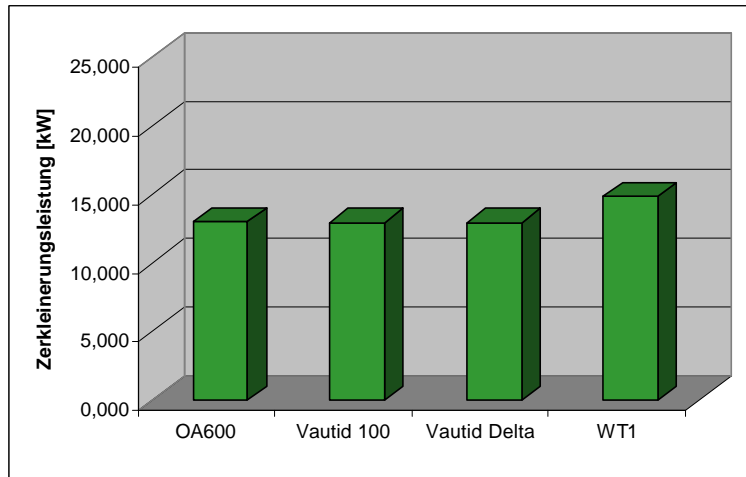
5.7 Zusammenfassung der Betrachtungen zum Verschleiß

Der Werkstoff Hexadur®-WT2 ist bei allen durchgeführten Verschleißversuchen der Werkstoff mit den besten Verschleißeigenschaften. Die nachgewiesenen Daten haben unterstrichen, daß die Entwicklung einer Verschleißschutzoberfläche, in der Hartphasen verschiedener Größe in einer Matrix eingebettet sind, der richtige Weg war, um einen Werkstoff zu erzeugen, der einen großen Bereich an Einsatzgebieten abdecken kann. Mit Hilfe der Pulvermetallurgie konnten Fehler wie beispielsweise Härterisse und die ungleichmäßige Verteilung der Hartphasen verhindert werden.

Die Ergebnisse haben gleichfalls deutlich gemacht, daß die Standfestigkeit einer Auftragschweißung in entscheidendem Maße von der Qualität der Aufschweißung abhängig ist. Bereits scheinbar kleine Schweißfehler führen zu verheerenden Schädigungen an den Oberflächen der Walzen.

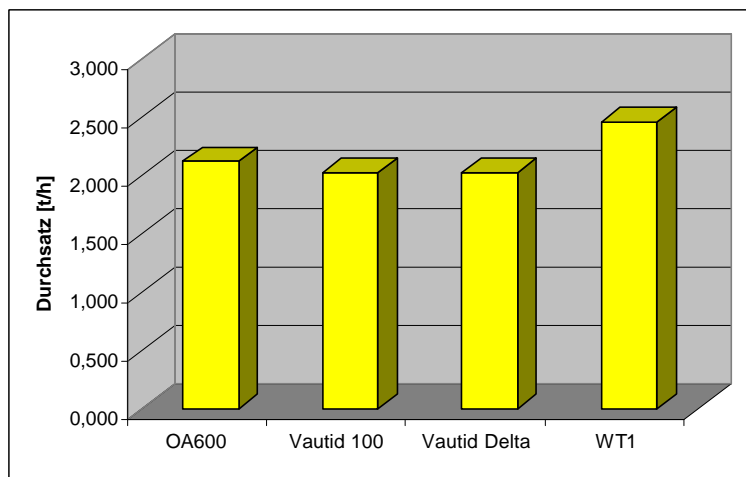
5.8 Aussagen zu aufgenommenener Leistung und Durchsatz

Wie unter Punkt 5.4.3 bereits erwähnt, ist es wenig sinnvoll, einen Verschleißwerkstoff zu nutzen, der zwar gute und sehr gute Verschleißbeständigkeit aufweist, jedoch die Leistung der Maschine absenkt, was sich letztendlich in verminderter Leistungsaufnahme und verminder-



tem Durchsatz widerspiegelt. **Abb.85:** Zerkleinerungsleistung für Diabas

Aus diesem Grund sollen nun einige Betrachtungen zu aufgenommenener Leistung und erreichtem Durchsatz bei den einzelnen Versuchen getätigt werden. In der Abbildung 85 kann man erkennen, daß bei Verwendung der drei Auftragschweißwerkstoffe in etwa die gleiche Zerkleinerungsleistung aufgenommen wird. Schließt man diesen



Werten die Meßergebnisse des erreichten Durchsatzes an, der in Abbildung 84 dargestellt ist, so sieht man eine gewisse Ähnlichkeit im Verlauf. Auch beim Durchsatz weist WT1 den besten Wert auf. Durch die Bildung des Quotienten aus Zerkleiner-

Abb.84: Durchsatz für Diabas

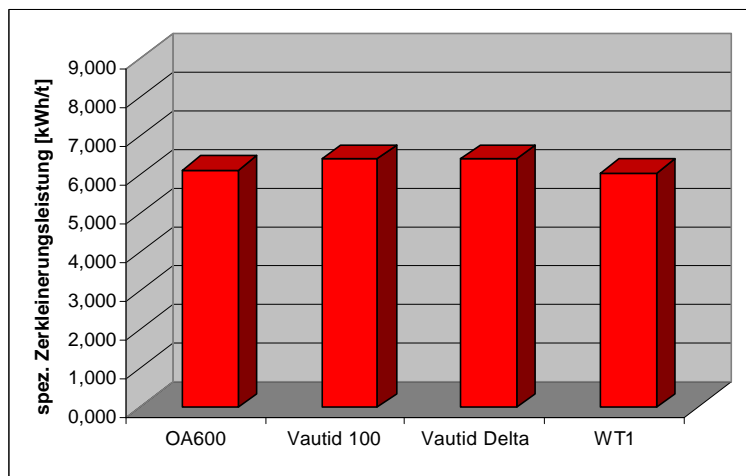


Abb.86: spezifische Zerkleinerungsleistung für Diabas

rungsleistung und Durchsatz erhält man die spezifische Zerkleinerungsleistung, die in der Abbildung 86 zu sehen ist. Sie ist für alle verwendeten Verschleißwerkstoffe etwa gleich. Das heißt, daß es mit WT1 nicht möglich ist, mehr Zerkleinerungsenergie in das Abrasiv einzubringen als mit den Auftragschweißungen.

Die Meßwerte für Klinker (Abbildung 87) zeigen, daß WT1 gegenüber den Auftragschweißungen in etwa genauso viel Zerkleinerungsleistung aufnimmt, WT2 dagegen mehr.

Bei Betrachtung des Durchsatzes (Abbildung 88) fällt auf, daß WT1 und WT2 einen wesentlich größeren Durchsatz aufweisen als die Auftragschweißungen, die im Übrigen alle auf dem gleichen Niveau liegen. Die Berechnung des Quotienten erbringt die in der Abbildung 89 dargestellten Werte. Es wird ersichtlich, daß es nicht möglich

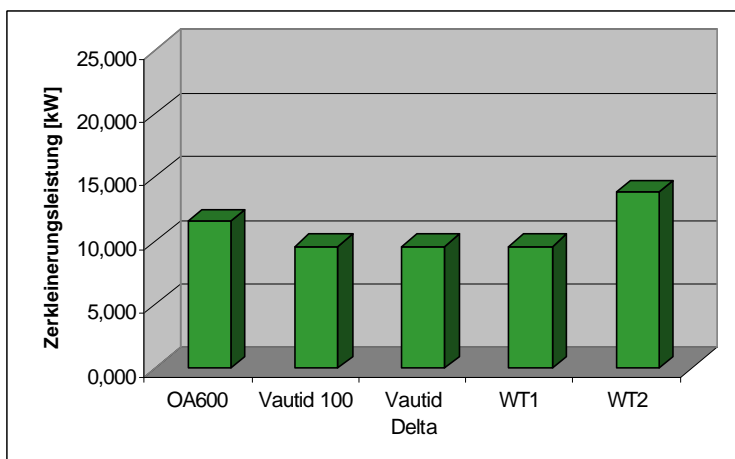


Abb.87: Zerkleinerungsleistung für Klinker

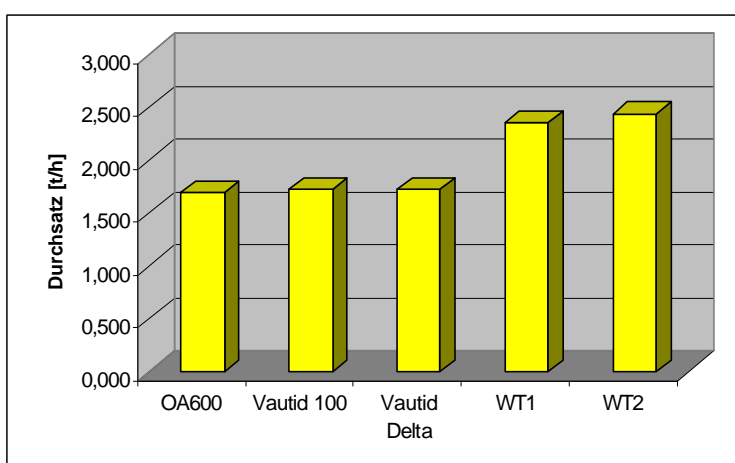


Abb.88: Durchsatz für Klinker

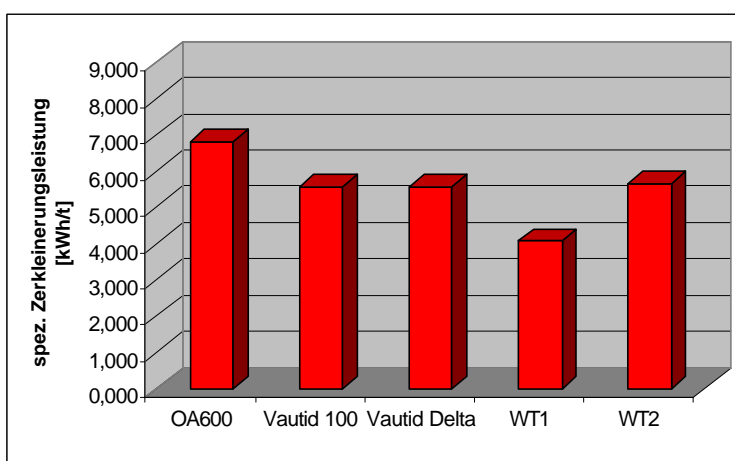


Abb.89: spez. Zerkleinerungsleistung für Klinker

ist, mit WT1 annähernd so viel Zerkleinerungsleistung in das Abrasiv einzubringen, wie es bei den übrigen Werkstoffen der Fall ist. Der höchste Wert wurde hier für den Werkstoff OA600WM ermittelt. Die Ergebnisse für WT2 und die beiden Vautid-Werkstoffe sind in

etwa gleich. erinnert man sich nun an die im Bild 80 dargestellten Verschleißwerte, so wird offensichtlich, daß WT1 für den getesteten Klinker kein optimaler Werkstoff war, um bei gleichem Verschleißverhalten die Leistungen der Anlage zumindest auf dem Niveau einer Auftragschweißung zu halten.

Stellt man natürlich verfahrenstechnische Berechnungen im Hinblick auf die zu erwartenden Umlaufzahlen an, kann es allerdings möglich sein, daß sich der Werkstoff WT1 auch beim Klinker bewährt. Das ist aber eine Frage, die nicht in dieser Arbeit beantwortet werden kann.

Die bei den Versuchen mit Quarzit gemessenen Zerkleinerungsleistungen unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Alle Werte liegen unter 10 kW. Zur Zerkleinerung von Quarzit ist vergleichsweise wenig Energie notwendig, was auf das spröde Verhalten dieses Gesteins zurückzuführen ist.

Der Werkstoff WT1 weist in etwa die gleichen geringen Durchsatzwerte auf wie die aufgeschweißten Werkstoffe. WT2 liegt hier 0,2 t/h höher (Bild 91).

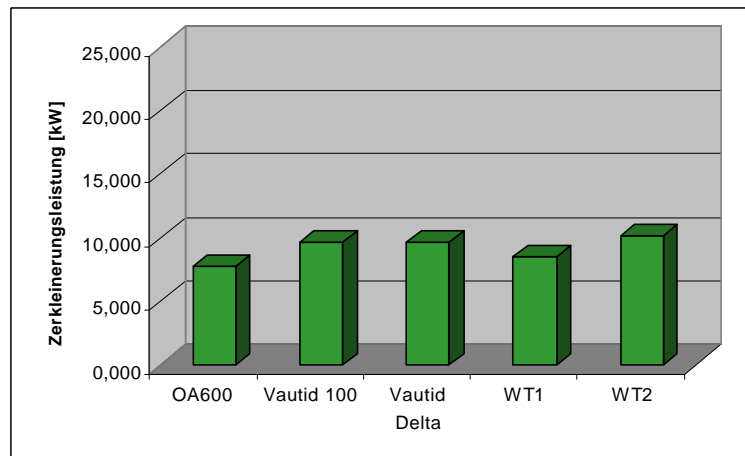


Abb.90: Zerkleinerungsleistung für Quarzit

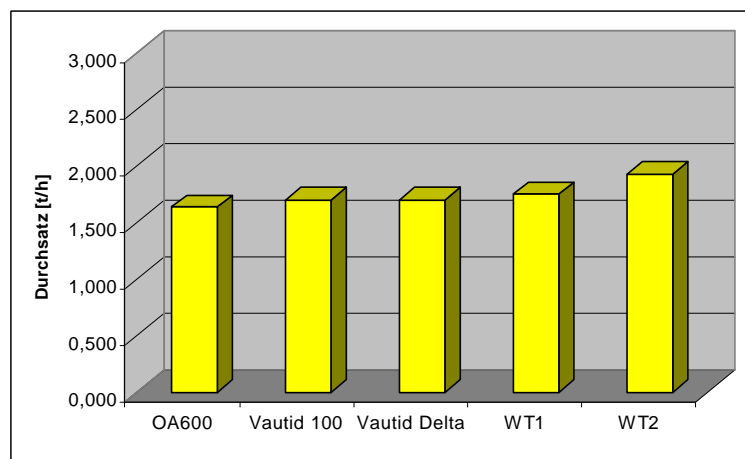


Abb.91: Durchsatz für Quarzit

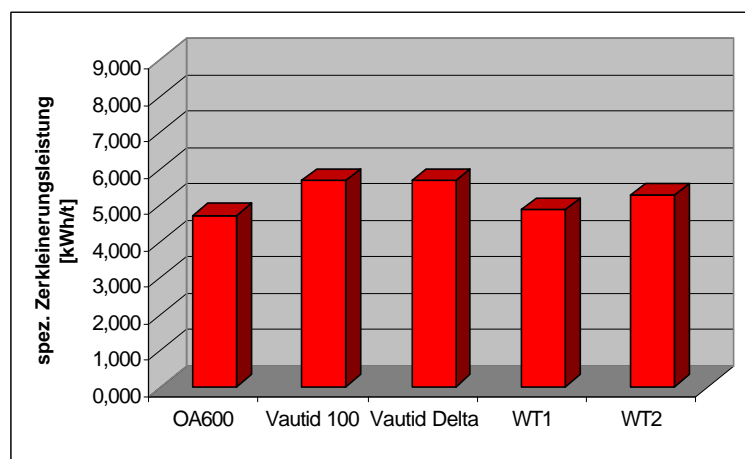


Abb.92: spezifische Zerkleinerungsarbeit für Quarzit

Die Berechnung der spezifischen Zerkleinerungsleistung ergab die Ergebnisse, die in der Abbildung 92 zu sehen sind. WT1 liegt in etwa auf der Höhe von OA600WM, während mit WT2 ca. 0,4 kWh/t weniger spezifische Zerkleinerungsleistung aufgebracht wird als mit den Vautid-Werkstoffen.

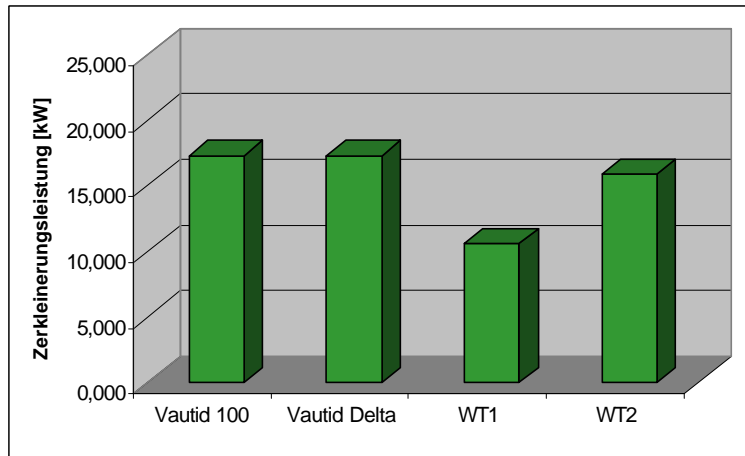


Abb.93: Zerkleinerungsleistung für Kimberlit

Betrachtet man nun aber wiederum das Verschleißverhalten der einzelnen Werkstoffe, dann ist es für die Zerkleinerung von quarzreichen Gesteinen mehr als sinnvoll, einen Hexadur®-Werkstoff einzusetzen.

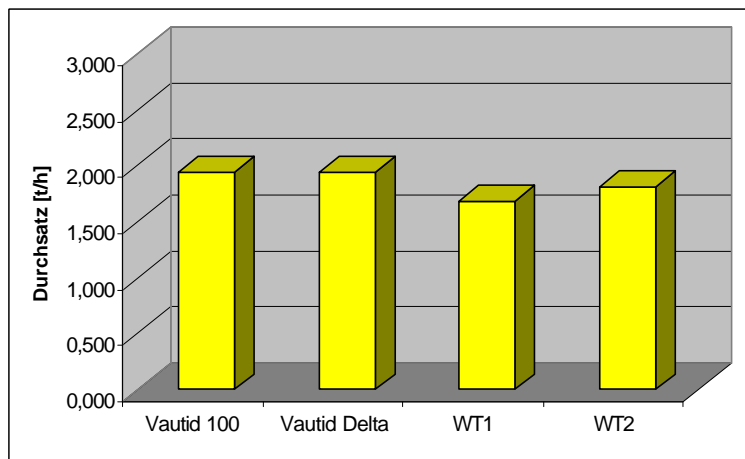


Abb.94: Durchsatz für Kimberlit

Auch bei Kimberlit zeichnet sich eine ähnliche Tendenz ab wie bei Quarzit. Hier liegen die Werte für die Zerkleinerungsleistung (Abbildung 93) wesentlich höher. Grund dafür ist die bessere Kompaktierbarkeit des Kimberlit. Im Durchsatz (Abbildung 94) unterscheiden sich beide Abrasive nicht wesentlich voneinander. Vernachlässigt man nun in

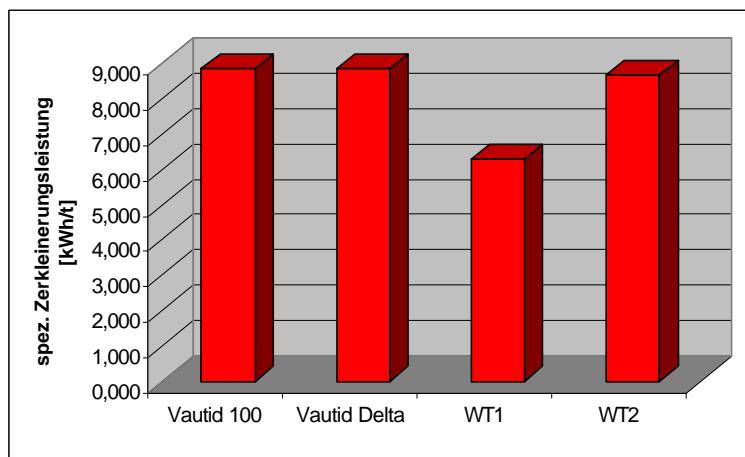


Abb.95: spez. Zerkleinerungsleistung für Kimberlit

den Abbildungen 92 und 95 die zahlenmäßige Größe der spezifischen Zerkleinerungsleistung, so ergibt sich auch hier zwischen Quarzit und Kimberlit im Verlauf kein wesentlicher Unterschied. Ruft man sich allerdings den Verschleißbetrag für die Werkstoffe in

Verbindung mit Kimberlit in Erinnerung (Abbildung 82), so kommt man zu dem Ergebnis, daß Vautid 100 im Wesentlichen die selben und bessere Ergebnisse liefert als WT1. Für WT2 ist die Situation die, daß trotz Gleichheit bei der eingebrachten spezifischen Zerkleinerungsleistung wesentlich bessere Verschleißergebnisse erreicht wurden.

Beim Eisenerz ergibt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 96). Sowohl für WT1 als auch für WT2 ergeben sich wesentlich höhere Werte. Der Unterschied zu den Vautid-Werkstoffen beträgt 7 bis 10 kW, je nach WT-Typ.

Bei Betrachtung der Übersicht zum Durchsatzverhalten der Werkstoffe in Bezug auf Eisenerz sieht man prinzipiell einen ähnlichen Verlauf wie bei der Zerkleinerungsleistung. Die Verwendung von WT2 führt zu einem wesentlich größeren Durchsatz als bei WT1.

Die Berechnung der spezifischen Zerkleinerungsenergie (Abbildung 98) erbringt als Ergebnis, daß mit beiden WT-Werkstoffen dieselbe spezifische Zerkleinerungsenergie

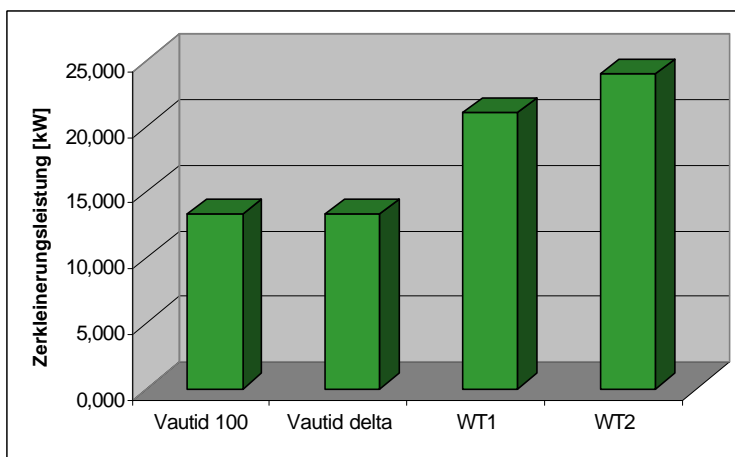


Abb.96: Zerkleinerungsleistung für Eisenerz

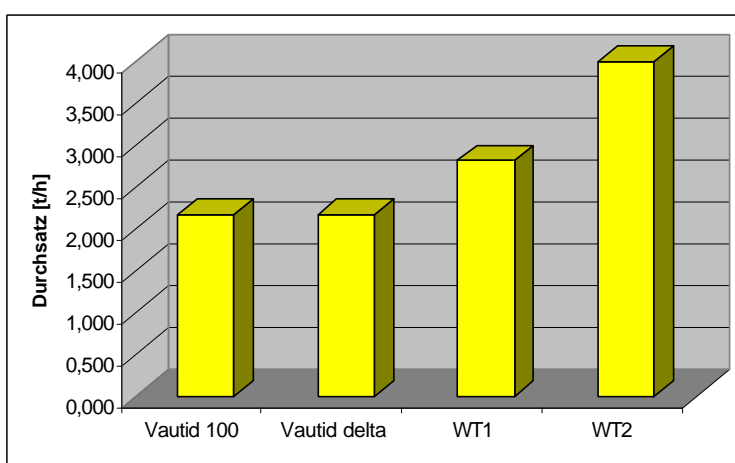


Abb.97: Durchsatz für Eisenerz

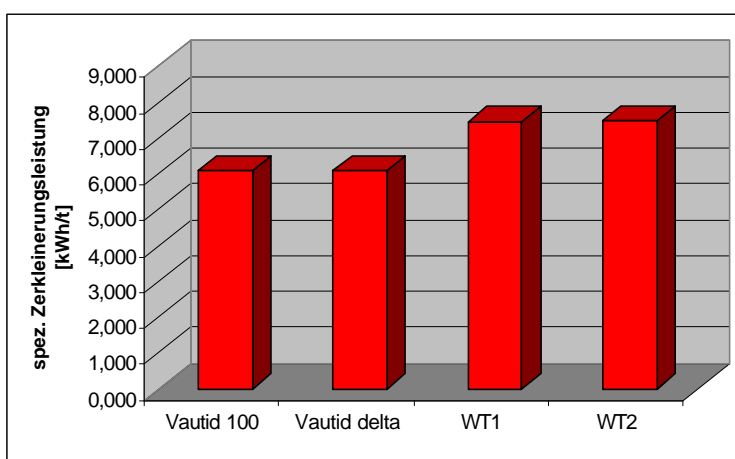


Abb.98: spez. Zerkleinerungsenergie für Eisenerz

eingebraucht wird, die größer als die der beiden Vautid-Werkstoffe ist. An dieser Stelle soll noch einmal der Gedanke zurück auf die Diskussion des Verschleißverhaltens der Werkstoffe bei Eisenerz gelenkt werden (Abbildung 83). Hier sind beide WT-Werkstoffe besser geeignet als die Auftragschweißungen. Mit Hilfe von WT1 ist es möglich, bei gleicher Verschleißhöhe in Bezug auf Vautid 100 mehr Zerkleinerungsenergie in das Gutbett einzubringen. WT2 weist gegenüber WT1 die wesentlich besseren Verschleißwerte auf.

5.9 Praxisrelevanz der Versuchsergebnisse

Die bisher vorgestellten Ergebnisse wurden alle auf der Versuchs-Gutbett-Walzenmühle der TU Bergakademie Freiberg ermittelt. Zur Beurteilung der Praxisrelevanz müssen all diese Werte auf geeignete Art und Weise mit entsprechenden praktischen Werten verglichen werden. Hier liegt allerdings die Schwierigkeit. Es ist nahezu unmöglich, die Betreiber solcher Anlagen davon zu überzeugen, technische Daten hinsichtlich Drehzahl, Preßdruck, Spaltweite u.s.w. zu übermitteln.

Von einer Anlage, die zur Zerkleinerung von Kupfererz dient, liegen allerdings Daten

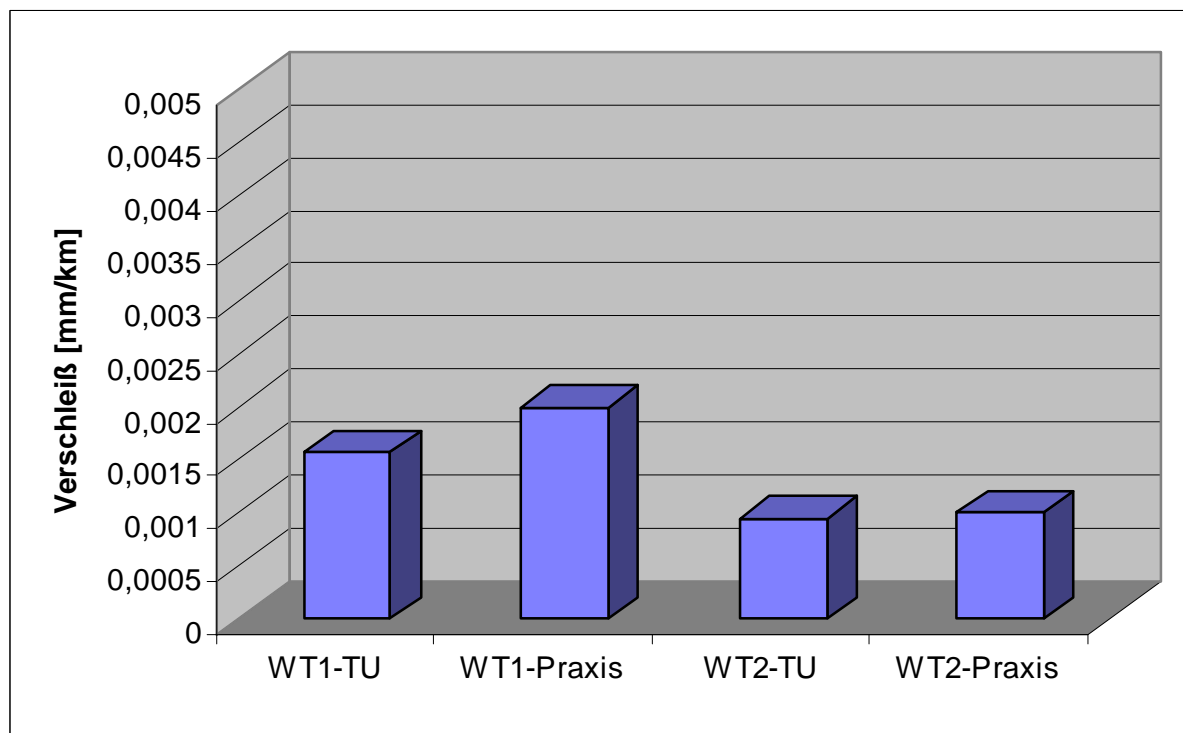


Abb.99: Vergleich der Praxiswerte mit Versuchswerten

bezüglich Durchsatz, Preßkraft, Drehzahl und Verschleiß vor.

Dies war der Anlaß dafür, eine Testreihe mit eben dem selben Material auf der Versuchsanlage der TU Bergakademie Freiberg zu fahren. Die Werte für WT1 und WT2 wurden nach dem selben Prinzip ermittelt wie die obenstehenden Werte und sind in der Abbildung 99 dargestellt. Es ist eine Ähnlichkeit erkennbar, die beim WT2 sogar fast exakt ist. Dieses Ergebnis zeigt, daß es möglich ist, mit einer versuchstechnischen Anlage Praxisbedingungen zu simulieren. Natürlich ist es notwendig, diese zwei ermittelten Ergebnisse durch weitere Werte zu untermauern, um letztendlich die zur Zeit tendenziellen Aussagen hinsichtlich des Verschleißverhaltens bei Zerkleinerung des einen oder anderen Aufgabegutes mit einer gewissen Sicherheit zu hinterlegen. Es kann eingeschätzt werden, daß mit dem Betrieb dieser Versuchs-Walzenpresse bis zum jetzigen Stand zahlreiche positive Ergebnisse verbunden sind, die zum Teil auch schon in Betriebsanlagen Anwendung finden.

6 Zusammenfassung

Im Jahre 1985 kam die Gutbett-Walzenmühle, auch Walzen- oder Rollenpresse genannt, zur praktischen Anwendung.

Im Bereich der Zerkleinerungsmaschinen erlangte die Gutbett-Walzenmühle eine immer stärker werdende Bedeutung.

Vorrangig wurde diese Maschine zur Zerkleinerung spröder Materialien in der Zementindustrie eingesetzt. Ihr Einsatzgebiet erweiterte sich sehr schnell auch auf die Steine- und Erden- Industrie.

Anfangs noch als Ergänzung für bereits vorhandene Mahlanlagen für Zementklinker und Hochofenzement eingesetzt, um die Leistung der Anlage zu steigern und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken, sind sie mittlerweile auch für zahlreiche andere Aufgaben im Einsatz, so beispielsweise zum Brechen von Kimberlit oder zur Mahlung verschiedener Erze oder Steinkohle.

Die erfolgreiche Einführung der Gutbettzerkleinerung mit Hilfe der Gutbett-Walzenmühle ist hauptsächlich begründet in dem geringen spezifischen Energieverbrauch und der Möglichkeit der unkomplizierten Einbindung in bereits bestehende Mahlsysteme.

Das Wissen um das enorme Einsparungspotential wurde zum Anlaß für umfangreiche Bemühungen, die Gutbett-Walzenmühle auch in anderen Industriebereichen zur Zerkleinerung härterer Materialien einzusetzen. Auf diesem, für die Gutbett-Walzenmühle neuartigen Gebiet existierten jedoch erst wenige Erkenntnisse bezüglich des Verschleiß- und Zerkleinerungsverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen technologischen Parametern. Kenntnisse darüber sind jedoch von enormem Nutzen für eine exakte verfahrens- und maschinentechnische Auslegung der Gutbett-Walzenmühlen.

Unter Berücksichtigung der Komplexität der tribologischen Vorgänge einerseits und der Kosten für eine praxisnahe Versuchsdurchführung andererseits ist mit Hilfe der durchzuführenden Versuche eine systematische Annäherung an die in der Praxis vorherrschenden Tribosysteme erforderlich.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, einen Beitrag zur Verschleißminderung der Arbeitsorgane von Gutbett-Walzenmühlen zu leisten.

Ausgehend von einer umfangreichen Literaturrecherche zum Dreikörper-Abrasivver-

schleiß und auf diesem Gebiet etablierten Verschleißprüfmethoden und einem anschließenden Vergleich mit den gestellten Anforderungen einer möglichst praxisnahen Versuchsdurchführung wurde ein Versuchsstand entwickelt und gebaut.

Herzstück der Versuchsapparatur ist eine Gutbett-Walzenmühle, deren Walzendurchmesser 300 mm beträgt. Die Arbeitsbreite der Walzen ist 70 mm. Die Walzen werden mit jeweils acht Segmenten bestückt. Die Segmentierung wurde gewählt, um die Ermittlung des Verschleißbetrages nach einem Versuch durch Wägung bzw. durch andere geeignete Meßstrategien möglichst exakt zu gestalten. Durch die Teilung in acht Segmente erhält man acht Meßwerte pro Versuch und genügt damit einer statistischen Sicherheit. Die Versuchsanlage wurde mit zahlreichen Meßstellen ausgerüstet, die es dem Betreiber erlauben, verschiedene Betriebsparameter wie Drehzahl, Preßdruck, Leistungsaufnahme, Durchsatz und Spaltweite rechentechnisch zu erfassen, um diese Daten einer Versuchsauswertung zugrundelegen zu können.

Nach einer Reihe von einführenden Versuchen wurden verschiedene Verschleißschutzwerkstoffe mit unterschiedlichen Abrasiven getestet.

Als Verschleißschutzwerkstoffe kamen drei geschweißte Versionen (OA600WM, Vautid 100, Vautid delta) und zwei pulvermetallurgisch erzeugte Varianten (Hexadur®-WT1, Hexadur®-WT2) zum Einsatz.

Aufgrund der zeit- und kostenaufwendigen Versuchsdurchführung wurde bei der Versuchsplanung Wert darauf gelegt, vorrangig praxisrelevante Paarungen von Werkstoffen und Abrasiven zu testen.

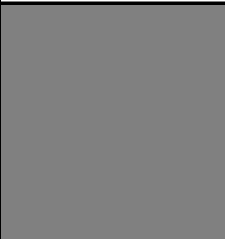





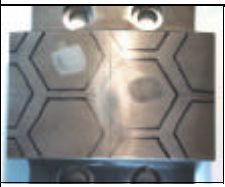



Der Verschleißbetrag wurde bei den geschweißten Versionen durch Bestimmung des Gewichtsverlustes mit Hilfe einer Präzisionswaage ermittelt. Diese Art der Verschleißbestimmung konnte bei den beiden pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffen nicht angewendet werden. Hier wurde der Verschleiß durch Ermittlung des Höhenabtrages bestimmt. Zu diesem Zweck wurden alle Segmente auf einem dreidimensionalen Meßgerät ausgemessen. Die Meßergebnisse wurden rechentechnisch erfaßt und konnten problemlos einer weiteren Bearbeitung zugeführt werden.

Der Verschleißbetrag wurde als dimensionslose Größe der Verschleißintensität dargestellt und diskutiert, um die Versuchsergebnisse untereinander und auch in Bezug auf Praxiswerte vergleichbar zu gestalten.

Die durchgeführten Versuche haben bewiesen, daß es nicht legitim ist, einen Verschleißschutzwerkstoff lediglich im Hinblick auf sein Verschleißverhalten zu bewerten. Wichtig ist es, parallel zu den erfaßten Verschleißwerten auch verfahrenstechnische Parameter wie eingeleitete Zerkleinerungsenergie und Durchsatz zu betrachten. Aus diesem Grund wird im Anschluß an diese Zusammenfassung eine Übersicht dargestellt, in der alle getesteten Werkstoffe und Abrasive aufgelistet sind. Die Zahlenwerte in den einzelnen Feldern geben die Platzziffer an, die jeder Werkstoff bei einem Versuch mit dem jeweiligen Abrasiv erreicht hat.

Es ist gelungen, eine Versuchsapparatur zu entwickeln, die es gestattet, mit vergleichsweise geringem Aufwand praxisrelevante Werte zu ermitteln, die die Möglichkeit bieten, den gewählten Werkstoff für den jeweiligen Anwendungsfall zu bewerten. Erste vergleichende Versuche haben dies bestätigt. Natürlich müssen diese Aussagen durch eine gewisse Anzahl an praktisch ermittelten Werten untermauert werden. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, daß es sich immer wieder als problematisch erweist, von Seiten der Betreiber Praxiswerte bezüglich Durchsatz, Leistungsaufnahme, Drehzahl, Spaltweite und Verschleiß zu erhalten. Die Aufgabe sollte sein, die Betreiber für diese Fragen zu sensibilisieren.

Anhand der Darstellung ausgewählter Untersuchungsergebnisse wurde die Eignung der Versuchs- und Auswertetechnik zur Erreichung des Untersuchungsziels nachgewiesen.

Werkstoff	Ausgangszustand	Diabas				Zementklinker				Quarzit				Kimberlit				Eisenerz				Endzustand
		W	P _{zer}	M	P _{spe_z}	W	P _{zer}	M	P _{spe_z}	W	P _{zer}	M	P _{spe_z}	W	P _{zer}	M	P _{spe_z}	W	P _{zer}	M	P _{spe_z}	
OA600WM		3	2	2	2	5	2	4	1	4	4	4	4									
Vautid 100		2	2	3	1	2	3	3	3	3	2	3	1	3	1	1	1	3	3	3	2	
Vautid delta		4	2	3	1	3	3	3	3	5	2	3	1	4	1	1	1	4	3	3	2	
Hexadur® WT1		1	1	1	3	4	3	2	4	2	3	2	3	2	3	3	2	2	2	2	1	
Hexadur® WT2						1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	

Verzeichnis der Abbildungen

Abb.1:	Vergleich der Merkmale von Abrasiv-Gleit-, Abrasiv-Stoß- und Dreikörper-Abrasivverschleiß	11
Abb.2:	Beispiele von Spaltgeometrien beim Dreikörper-Abrasivverschleiß 1...Grundkörper; 2...Gegenkörper; 3...Zwischenstoff; 4...Erosionszone	12
Abb.3:	Verschleiß im Gelenk eines Rundstahlkettengliedes	12
Abb.4:	Nahaufnahme der verschlissenen Oberfläche des Kettengliedes	12
Abb.5:	Erosionsbereich mit Riefen, Einsatzhärtungszone abgetragen (Abb.4e vergrößert)	12
Abb.6:	vergrößerter Erosionsbereich aus Abb.5	12
Abb.7:	Darstellung der Korngrößenabhängigkeit des Dreikörper-Abrasivverschleißes	13
Abb.8:	Druckverlauf in Abhängigkeit vom Weg bei der Beanspruchung einer Lage von je 50 1,1 mm großen Quarz- und Kalksteinkörnern [6]	14
Abb.9:	Abhängigkeit der zur Zerstörung von Quarzkörnern erforderlichen Druckkraft von der Plattenhärte [18]	15
Abb.10:	Kontaktstellenausbildung in Abhängigkeit vom Härteverhältnis H_w/H_a 1...Grundkörper; 2...Gegenkörper	15
Abb.11:	Modell der verschiedenen Kontaktarten beim Dreikörper-Abrasivverschleißsystem [7]	16
Abb.12:	Formen des abrasiven Verschleißes (für Mikroberechnen gilt: links Werkstoff mit harten Phasen, rechts keramischer Werkstoff) . . .	17
Abb.13:	Theoretischer Verlauf der Tieflage/Hochlage-Charakteristik a) Paarung gleicher Härte; b) Paarung ungleicher Härte	17
Abb.14:	Verschleiß verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Abrasivstoffhärte; Klotz/Ring-Verfahren; $d_k = 0,25-0,3$ mm; Wasser/Abrasivstoff = 1,55; $p = 0,37$ N/mm ² ; $v = 0,6$ m/s [30]	18
Abb.15:	Vergleich des relativen Verschleißverhaltens unlegierter Kohlenstoffstähle unterschiedlicher Mikrostruktur und Härte bei gerundetem und gebrochenem Quarz	19

Abb.16:	Hartguß mit 30 % Cr bei verschiedenen Kohlenstoffgehalten	23
Abb.17:	Stahl X210Cr12, durch Wärmebehandlung erzeugte unterschiedliche Härte	23
Abb.18:	Verschleißprüfung mit verschiedenen Verfahren und Abrasiven	23
Abb.19:	Schema einer Gutbett - Walzenmühle	24
Abb.20:	oben: axiale Druckverteilung unten: radiale Druckverteilung	25
Abb.21:	Schema des Walzenspaltes	25
Abb.22:	Verschiedene Betriebszustände einer Gutbett - Walzenmühle	27
Abb.23:	Grenzlinien der Korngrößenverteilung nach Andreasen	29
Abb.24:	Eingeleitete spezifische Energie in Abhängigkeit der normierten Verdichtung	31
Abb.25:	Energieausnutzung über dem Verhältnis von Enddichte zur Anfangsdichte	32
Abb.26:	Schematische Darstellung des schlupffreien Bereiches	33
Abb.27:	Kräfte im Walzenspalt	38
Abb.28:	Kraftangriffswinkel β	39
Abb.29:	Geometrische Größen der Walze	42
Abb.30:	Druckverlauf in Abhängigkeit der spezifischen Mahlkraft	43
Abb.31:	Druckverläufe bei verschiedenen Materialien, Umfangsgeschwindigkeiten und Körnungen	43
Abb.32:	Wannenförmiges Verschleißprofil der Walzen einer Gutbett-Walzenmühle	48
Abb.33:	Peeling, Ablösen der Hartschicht	49
Abb.34:	Aufbau der Panzerung (KHD)	52
Abb.35:	Verschleißgünstige Walzengeometrie	55
Abb.36:	Prinzipskizze der KHD-Segmentkonstruktion	56
Abb.37:	Verschleißkosten	57
Abb.38:	Schema der Rasterpanzerung a: Welle, b: Walzenkörper, c: Kantenschutz, d: Hartmetallstifte e: "autogene" Verschleißschutzschicht	59

Abb.39:	Oberflächenprofil lt. EP 0 443 195 A1 10; 11..Mahlwalzen, 12; 13; 14..Profilleisten, 15..Profiltaschen	60
Abb.40:	Gutbett-Walzenmühle	62
Abb.41:	Aufgabebunker mit einem Fassungsvermögen von 5 m ³	62
Abb.42:	Materialzuführung	63
Abb.43:	Walze mit Segmenten	63
Abb.44:	Wegaufnehmer	64
Abb.45:	Rechentechnische Meßwerterfassung	64
Abb.46:	Aufstellung der Verschleißwerte der einführenden Versuche	67
Abb.47:	Verschleißmittelwerte für einzelne Geschwindigkeiten, getrennt nach Los- und Festwalze	68
Abb.48:	Buchsenverschleiß bei verschiedenen Abrasiven	69
Abb.49:	aufgenommene Gesamtleistung (Mittelwert)	70
Abb.50:	Leerlaufleistung (Mittelwert)	70
Abb.51:	Zerkleinerungsleistung (Mittelwert)	71
Abb.52:	Durchsatz (Mittelwert)	71
Abb.53:	Betriebsspaltweite ohne Nullspalt (Mittelwert)	72
Abb.54:	spezifische Zerkleinerungsarbeit (Mittelwert)	73
Abb.55:	Verschleißintensität	74
Abb.56:	links: nicht spaltbarer Quarzit mit Kristallflächen und muscheligen Bruch rechts: Spaltstück des vollkommen spaltbaren Minerals Calcit	77
Abb.57:	Eisenerz mit Quarzadern	78
Abb.58:	Kimberlit	78
Abb.59:	Zementklinker mit Alit und Belit	79
Abb.60:	Walzensegment mit Aufschweißung aus Vautid100	81
Abb.61:	Segment mit Aufschweißung aus Vautid δ	81
Abb.62:	Segment mit Vautid 100 nach den Versuchen	82
Abb.63:	Walzensegment mit Vautid δ nach den Versuchen	82
Abb.64:	Kantenausbruch links und Peeling	83
Abb.65:	Kantenausbruch bei einem Walzensegment mit OA600WM	83
Abb.66:	sichelförmiger Riß über die gesamte Segmentbreite	84

Abb.67:	Auswaschung im Randbereich eines Segmentes mit OA600WM	84
Abb.68:	Auswaschung quer zur Rotationsrichtung bei OA600WM	85
Abb.69:	Verschleißwerte für die Versuche mit Diabas	85
Abb.70:	Verschleißwerte für die Versuche mit Klinker	86
Abb.71:	Verschleißwerte für die Versuche mit Quarzit	87
Abb.72:	Verschleißwerte für die Versuche mit Kimberlit	87
Abb.73:	Verschleißwerte für die Versuche mit Eisenerz	88
Abb.74:	Verschleißoberfläche aus Hexadur®-WT1	90
Abb.75:	WT1 - Segment	91
Abb.76:	Für die Messung aufgeschraubte Segmente	92
Abb.77:	Meßtaster beim Ausmessen einer Segmentfliese	93
Abb.78:	Ausmessen einer Bohrung	93
Abb.79:	Verschleißwerte für die Versuche mit Diabas	94
Abb.80:	Verschleißwerte für die Versuche mit Klinker	94
Abb.81:	Verschleißwerte für die Versuche mit Quarzit	95
Abb.82:	Verschleißwerte für die Versuche mit Kimberlit	95
Abb.83:	Verschleißwerte für die Versuche mit Eisenerz	96
Abb.84:	Durchsatz für Diabas	98
Abb.85:	Zerkleinerungsleistung für Diabas	98
Abb.86:	spezifische Zerkleinerungsleistung für Diabas	98
Abb.87:	Zerkleinerungsleistung für Klinker	99
Abb.88:	Durchsatz für Klinker	99
Abb.89:	spez. Zerkleinerungsleistung für Klinker	99
Abb.90:	Zerkleinerungsleistung für Quarzit	100
Abb.91:	Durchsatz für Quarzit	100
Abb.92:	spezifische Zerkleinerungsarbeit für Quarzit	100
Abb.93:	Zerkleinerungsleistung für Kimberlit	101
Abb.94:	Durchsatz für Kimberlit	101
Abb.95:	spez. Zerkleinerungsleistung für Kimberlit	101
Abb.96:	Zerkleinerungsleistung für Eisenerz	102
Abb.97:	Durchsatz für Eisenerz	102

Abb.98:	spez. Zerkleinerungsenergie für Eisenerz	102
Abb.99:	Vergleich der Praxiswerte mit Versuchswerten	103

Literaturverzeichnis

- [1] Kneher, L.; Wahl, H.: Das Unbrauchbarwerden von Sachgütern - ein zentrales Problem.
Forschungen und Fortschritte 19 (1943) Nr.25/26, S.257/258
- [2] Kneher, L.; Wahl, H.: Die Bedeutung des Verschleißproblems, 1941
Persönliche Mitteilungen von H. Wahl 1983
- [3] Vogelpohl, G.: Die Reibung ausreichend geschmierter Maschinenteile im Hinblick auf eine rationelle Energiewirtschaft
Stahl und Eisen 70 (1950) 21
S. 930-936
- [4] Richter, K.;
Wiedemeier, J.: Abrasivverschleiß - Betroffene Industriezweige und volkswirtschaftliche Bedeutung
- [5] Lang, O.: Tribologie - Reibung, Verschleiß, Schmierung
Forschungsbericht T 76-38 des BMFT
Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.
Frankfurt/Main, Juli 1976
- [6] Rumpf, H.: Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft
Chem.-Ing.-Techn. 37 (1965) 3
S. 187-202
- [7] Günter, H.: Untersuchungen zum Verschleißverhalten metallischer Gleitpaarungen unter Berücksichtigung der Wirkung abrasiver Zwischenstoffe
Dissertation Bergakademie Freiberg 1981
- [8] Rabinowicz, E.; Dunn, L.A.;
Russel, P.G.: A study of abrasive wear under three-body conditions
Wear 4 (1961)
S. 345-355
- [9] Sasada, T.; Oike, M.;
Emori, N.: The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear
Wear 97 (1984)
S.291-302
- [10] Föhl, J.; Sommer, K.: Untersuchungen des Dreikörper-Abrasivverschleißes im Gelenk von Rundstahl- und Rundstahl-Bolzen-

- Ketten
Tribologie Bd.9 (1985)
S. 413-455 Springer-Verlag
- [11] Wellinger, K.: Einfluß der Korngröße von Quarzstaub auf das Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen
VDI-Zeitschrift 92 (1950) 15
S. 371-375
- [12] Miller, N.E.: Three-body abrasive wear with small size diamond abrasives
Wear 58 (1980)
S. 249-259
- [13] Uetz, H.: Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe
Werkstoffe und Korrosion 19 (1968) 8, S.665-676
- [14] Larssen-Basse, J.: Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion
Wear 12 (1968), S.35-53
- [15] Schönert, K.: Einzelkorn-Druckzerkleinerung und Zerkleinerungskinetik. Untersuchungen an Kalk-, Quarz- und Zementklinkerkörnern des Größenbereichs 0,1...3mm
Dissertation Karlsruhe 1966
- [16] Steier, K.; Schönert, K.: Verformung und Bruchphänomene unter Druckbeanspruchung von sehr kleinen Körnern aus Kalkstein, Quarz und Polystyrol
3. Europäisches Symposion "Zerkleinern" in Cannes 5.-8.10.1971
DECHEMA-Monographien Nr. 1292-1326, Bd. 69 Teil 1, S. 167-192
- [17] Buss, B.; Schubert, H.: Ergebnisse von Untersuchungen zerkleinerungstechnischer Mikroprozesse
Neue Bergbautechnik 8 (1978) 12, S. 706-710
- [18] Tenenbaum, M.M.: Verschleißbeständigkeit von Konstruktionswerkstoffen und Maschinenelementen bei abrasiver Beanspruchung
Verlag Maschinostroenie, Moskau 1966
- [19] Aziz, J.A.: Zerkleinerung von Zementklinker in Einzelkornsituation, Kornschichten und im Gutbett
Dissertation TH Karlsruhe 1979

- [20] Heß, W.; Schönert, K.: Druck-, Scherbeanspruchung von Kugeln und unregelmäßig geformten Partikeln
4. Europäisches Symposion "Zerkleinern" in Nürnberg, 15.-17.09.1975 Verlag Chemie, Weinheim 1976
- [21] Kerber, A.; Schönert, K.: Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei der Einzelkorn - Druckzerkleinerung
GVC-Fachauschuß "Zerkleinern", 18.-20.03.1984 in Freising-Weihenstephan
- [22] v.Engelhardt, W.;
Haussühl, S.: Festigkeit und Härte von Kristallen
Fortschritte der Mineralogie 42, (1964)
S. 5-49
- [23] v.Engelhardt, W.: Untersuchungen über die Schleifhärte des Quarzes und anderer fester Stoffe in verschiedenen Flüssigkeiten
Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Math.-Phys. Kl 1942, Heft 2, S.7-34
- [24] Rehbinder, P.: Verminderung der Ritzhärte bei Absorption grenzflächenaktiver Stoffe. Sklerometrie und Physik disperser Stoffe. Zeitschrift für Physik 72 (1931), S.191-205
- [25] v.Engelhardt, W.: Schleiffestigkeit und Grenzflächenenergie fester Stoffe
Die Naturwissenschaften (1946) 7, S.195-203
- [26] v.Engelhardt, W.;
Haussühl, S.: Schleiffestigkeit und spezifische freie Grenzflächenenergie der Alkalihalogenide vom NaCl-Typus
Kolloid-Zeitschrift 173 (1960) 1, S.20-35
- [27] Kusnezow, D.W.: Einfluß der Oberflächenenergie auf das Verhalten fester Körper
Akademie-Verlag, Berlin 1961
- [28] Schönert, K.; Rumpf, H.: Versuche zur Zerkleinerung von Einzelteilchen zwischen zwei Flächen
1. Europäisches Symposion "Zerkleinern", 10.-13.4.1962 in Frankfurt/Main, S.108-127
Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstraße, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [29] Haworth, R.D.: The abrasion resistance of metals
Transactions of the American Society for metals 41 (1949), S.819-869

- [30] Avery, H.S.: The measurement of wear resistance
Wear 4 (1961), S.427-449
- [31] Moore, M.; Swanson, P.: The effect of particle shape on abrasive wear: a comparison of theory and experiment.
Wear of materials 1983, S.1-11
- [32] Wahl, H.: Allgemeine Verschleißfragen
Schriftenreihe Verschleißfragen, Heft A1 1941
- [33] Wahl, H.: Allgemeine Ordnungsprobleme bei der Bearbeitung von Verschleißfragen insbesondere durch Verschleißprüfung
Gießerei 53 (1966) 13, 421/30
- [34] Popov, V.S.; Brykov, N.N.; Pugachev, G.A.: Device for testing materials for abrasive wear during reciprocating motion
Industrial Laboratory 41 (1975) 3
S. 454-456
- [35] Lubjuhn, U.: Materialtransport und Druckverteilung im Spalt der Gutbett-Walzenmühle
Dissertation TU Clausthal; 1992
- [36] Patzelt, N.: Gutbett-Walzenmühlen
Praxiswissen Verfahrenstechnik,
"Zerkleinerungstechnik", 2. Auflage
Fachbuchverlag Leipzig, S. 120-158
- [37] Feige, F.: Zur Messung des Druckverlaufs bei der Beanspruchung einer Körnerschicht zwischen zwei Walzen
Aufbereitungs-Technik 30 (1989) Nr.10, S. 593-599
- [38] Patzelt, N.; Tiggesbäumker, P.: Konstruktive Lösungen für betriebssichere Mahlwalzen von Gutbett-Walzenmühlen
Zement-Kalk-Gips Nr. 2/1991, S. 88-92
- [39] Gerhardt, J.: Weiterentwicklung an Rollenpressen und Betriebsmessungen
KHD-Symposium 1990, S. 104-111
- [40] Kellerwessel, H.: Praxis der Hochdruckzerkleinerung
Zement-Kalk-Gips Nr. 2/1990, S. 57-64
- [41] Schmitz, T.: Modellierung der Zerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühle und Verknüpfung mit dem Schüttgutverhalten zur Voraussage kritischer

Betriebszustände
Dissertation TU Clausthal; 1993

- [42] GEOS Freiberg
Ingenieurges. mbH: Gesteinsanalyse, Prüfzeugnis S 139/91
Baustoff- und Bodenprüfstelle Kassel
- [43] Andreasen, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und
Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern
Mitteilungen aus dem Laboratorium für Mörtel, Glas
und Keramik der Kgl. techn. Hochschule Kopenhagen
- [44] Schmitz, T.; Kupper, D.: Einfluß rheologischer Parameter auf den Prozeß der
Gutbettbeanspruchung in der Walzenmühle
Teil 1: Zement-Kalk-Gips Nr. 2/1992, S. 79-85
Teil 2: Zement-Kalk-Gips Nr. 12/1992, S. 634-639
- [45] Schwechten, D.: Trocken- und Naßmahlung in der Gutbett-
Walzenmühle
Dissertation TU Clausthal; 1987
- [46] Kellerwessel, H.: Hochdruck-Gutbett-Zerkleinerung von mineralischen
Rohstoffen
Aufbereitungs-Technik 34 (1993) Nr.5
- [47] Kellerwessel, H.;
Rubin, G.: Gutbettzerkleinerung
Erzmetall Nr. 4/1987, S. 171-175
- [48] Rosemann, H.: Energieverbrauch und Betriebsverhalten der Gutbett-
Walzenmühle bei der Feinmahlung von Zement
KHD-Symposium 1989, S. 68-81
- [49] Feige, F.: Entwicklungsstand der Hochdruckzerkleinerung
Zement-Kalk-Gips Nr. 9/1993, S. 586-595
- [50] Mayerhauser, D.: Wirtschaftliche Feinzerkleinerung mit der Gutbett-
Walzenmühle
Aufbereitungs-Technik 31 (1990) Nr.5
- [51] Knobloch, O.: Testmethoden zur Bestimmung des Verschleißes an
Gutbett-Walzenmühlen
Zement-Kalk-Gips Nr. 2/1990, S. 77-80
- [52] Heinrich, R.: Untersuchungen zur Abrasivität von Böden als
verschleißbestimmender Kennwert
Dissertation TU Freiberg 1995

- [53] Galanulis, E.: Betriebserfahrungen mit einer Gutbett-Walzenmühle für abrasives Rohmaterial
Zement-Kalk-Gips Nr. 10/1988, S. 493-496
- [54] Diskussionsbeitrag Betriebserfahrungen mit neuen Segment-Panzerungen
KHD-Symposium 1992, S. 82-86
- [55] Battersby, M.J.G.; Kellerwessel, H.;
Oberheuser, G.: Important advances in the development of High Pressure Rolls comminution for the minerals industry
“Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals”,
Kalgoorlie, Australien 1992, S. 2-8
- [56] Brachthäuser, M.;
Wollner, M.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Gutbett-Walzenmühlen durch konstruktive Maßnahmen
Zement-Kalk-Gips Nr. 2/1991, S. 93-98
- [57] Oberheuser, G.: Wear protection of surfaces from High Pressure Grinding Rolls: Possibilities and Limits
- [58] Wüstner, H.: Druckzerkleinerung-Neue Wege der Energieeinsparung beim Mahlen von Zementklinker und Hüttensand
Zement-Kalk-Gips Nr. 12/1985, S. 725-727
- [59] Partz, K.-D.; Beck, R.: Walzen für Walzenmaschinen, insbesondere für Hochdruck-Walzenpressen
Europäische Patentanmeldung;
Veröffentlichungsnr. 0 383 004 A1
- [60] Scholz, E.: Walzenbeschichtung für die Walzen von Walzenpressen und Verfahren zum Aufbau der Walzenbeschichtung
Europäische Patentanmeldung;
Veröffentlichungsnr. 0 361 172 A1
- [61] Keller, G.: Verschleißfeste Oberflächenpanzerung für die Walzen von Walzenmaschinen, insbesondere von Hochdruck-Walzenpressen
Europäische Patentanmeldung;
Veröffentlichungsnr. 0 443 195 A1
- [62] Keller, G.: Verschleißfeste Oberflächenpanzerung für die Walzen von Walzenmaschinen, insbesondere von Hochdruck-Walzenpressen
Europäische Patentanmeldung;
Veröffentlichungsnr. 0 418 497 A1

- [63] Krupp Polysius AG: First Replacement of Segmented Liners
Wear conference Nov. 1990
- [64] Birch, E.: FLS Products Division
Hydraulik Roller Press
The F.L.Smith-Fuller News, February/March 1995, S.
14-16
- [65] Geoffrey, H.C.: Progress in Roller Press Design Technology
IEEE Meeting 1993, Toronto, Canada
- [66] Maresch, W.; Medenbach, O.;
Trochim, H.-D.: Gesteine
Mosaik Verlag GmbH München, 1987
- [67] Medenbach, O.;
Sussieck-Fornefeld, C.: Mineralien
Mosaik Verlag GmbH München
1982
- [68] <http://www.vautid.de/auftrag1.htm>
- [69] Schumacher, M.;
Theisen, W.: HEXADUR® - Ein neuer Verschleißschutz für
Hochdruck-Walzenmühlen
ZKG International, Nr. 10/1997 (50. Jahrgang)
S. 529-539