



## Informationen zu Steinmahlwerken

Wenig scheint man über die Mahlwerkstechnik zu wissen. Deshalb habe ich im folgenden einige relevante Stellen aus einer 1995 erstellten Dissertation (**Entwicklung einer energieoptimierten Steinscheibenmühle, Hohenheim 95**) zusammengestellt, und dazu die relevanten Erkenntnisse darlegt.

Vorab zusammenfassend:

Eine richtig gestaltete Steinoberfläche (Geometrie) führt zu günstigen Schnitt- und Scherkräften, die das Mahlgut schnell genug transportieren und fein genug mahlen. Stimmt dazu die Härte der Steine (ab Härte 7 der Mohs'schen Skala, Diamant hat die Härte 10) sowie die Korngröße, ist schon viel gewonnen. Ist dann auch das Material gewählt, welches zusätzlich eine genügend große Oberflächenrauigkeit ausweist, dann kann gut gemahlen werden.

**Gut mahlen heißt dann: fein, nicht zu heiß und mit wenig Energieaufwand.**

Auf den folgenden Seiten wird auch deutlich, dass Steine z.B. aus Granit nicht optimal sind. Sie können auf Dauer nicht das feine Mahlgut erbringen, verbrauchen wesentlich mehr Energie und erwärmen das Mahlgut viel stärker als die anderen Materialien.

(Dissertation ab Seite 90, Marmor wurde bei den Versuchen dazu genommen, weil er noch weicher als Granit ist und dadurch die Tendenz klarer wird. Hervorhebungen durch W. Mock)

### 6.2.1 Spezifischer Energiebedarf

Die Versuchsdurchführung erfolgt entsprechend den Untersuchungen an der Serienmühle. Je Steinpaar werden die Messwerte bei den Betriebsdrehzahlen  $n = 500, 750$  und  $1000 \text{ min}^{-1}$  aufgenommen. Bereits bei der Durchführung der Messungen können erhebliche Unterschiede beim Betriebsverhalten der einzelnen Steine festgestellt werden. **So erreichen die Mühlsteine aus den Granulaten mit geringer Härte (Granit und Marmor) bei der gegebenen Versuchsanordnung die geforderte Endfeinheit des Mahlgutes ... nicht.**

Mit den anderen Steinen kann der gewünschte Zerkleinerungsgrad problemlos erzielt werden.

Tabelle 9 zeigt die Zusammenstellung der erhaltenen Versuchsergebnisse.

Tabelle 9. Spezifischer Energiebedarf  $W_{\text{spez}}$  bei verschiedenen Versuchssteinen und die dazugehörige Standardabweichung  $s$ .

Drehzahl	Korund		Basalt		Quarz		Granit*		Marmor*		Korund/Quarz	
	$W_{\text{sp}}$	S										
500	1,46	0,168	1,47	0,163	1,47	0,163	1,66	0,156	2,04	0,140	1,65	0,161

700	1,57	0,166	1,57	0,158	1,57	0,165	2,00	0,148	2,34	0,142	1,74	0,155
1000	1,65	0,163	1,67	0,159	1,68	0,158	<b>2,38</b>	0,149	<b>2,61</b>	0,134	1,90	0,158

\* vorgegebener Feinheitsgrad wurde nicht erreicht

...

Die untersuchten Granulatmaterialien mit einer Mohs'schen Härte von 7 oder härter zeigen übereinstimmende Messwerte. Wird weicherer Grundmaterial eingesetzt, so kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs. Derlei Granulate sollten aber daher nicht für die Mühlensteinfertigung verwendet werden. Die Schwankungen des Drehmomentes im Antriebsstrang führen zu einer Ungleichförmigkeit des spezifischen Energiebedarfs, die sich wie beschrieben über den Wert der Standardabweichung  $s$  ausdrücken lässt. Die erhaltenen Ergebnisse unterscheiden sich bei den verschiedenen Steinmaterialien und Drehzahlen nur geringfügig, so dass bei der konstruktiven Auslegung der Antriebselemente kein abweichendes Verhalten berücksichtigt werden muss.

Wie bereits dargestellt ist durch eine hohe, aber lokal eng begrenzte Beanspruchung durch Schnitt- und Scherbelastung eine energiesparende Zerkleinerung möglich. Nimmt der spezifische Energiebedarf bei gleicher geometrischer Mülsteingestaltung und konstant gehaltenen Versuchsbedingungen, aber weicherem Granulatmaterial zu, so ist anzunehmen, dass die Zerkleinerung bei diesen Steinen weniger durch Schnitt- und Scherwirkung, als vielmehr durch andere Beanspruchung wie beispielsweise die Druckbelastung erfolgt. Es ist zu vermuten, dass ... Granit (W.M.) ... an den die Schneidarbeiten ausübenden Kanten bereits nach kurzer Zeit abgeschliffen ... ist ... und die abgestumpfte Mahlbahnoberfläche nur noch eine geringe Schnittwirkung ausüben kann.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Mahlsteine soll daher näher untersucht werden.

## 6.2.2 Gleitreibungskoeffizient und Oberflächenrauigkeit

Tritt das Getreide in den Mahlpalt ein, so beeinflussen die Reibungsverhältnisse der Materialpaarung Getreide/Stein die Zerkleinerung durch ein unterschiedlich starkes Gleiten des Mahlgutes auf der Steinoberfläche. Bei gleichem Aufgabegut, aber unterschiedlich beschaffenen Mülsteinen ist zu erwarten, dass die Mahlbahnoberflächen ein unterschiedliches Reibverhalten zeigen. Diese Eigenschaft soll durch Messungen auf einem Prüfstand erfasst werden.

...

Es soll daher im Folgenden versucht werden, eine Untersuchung der Mahlbahnbeschaffenheit durch eine Bestimmung der Oberflächenrauigkeit vorzunehmen.

Dazu wird der jeweils untersuchende Mülstein auf einer Präzisions-Fräsmaschine aufgespannt und waagrecht ausgerichtet. Das Fräswerk wird gegen eine Messuhr

mit einer Ablesgenauigkeit von  $\frac{1}{100}$  mm und kegelförmiger Tastspitze ausgetauscht. Durch Verschieben des Arbeitstisches kann jeder Punkt auf der Mühlsteinoberfläche angefahren und über die X-Y Koordinaten bestimmt werden. Bild 27 zeigt die Versuchsanordnung in einer schematischen Darstellung.

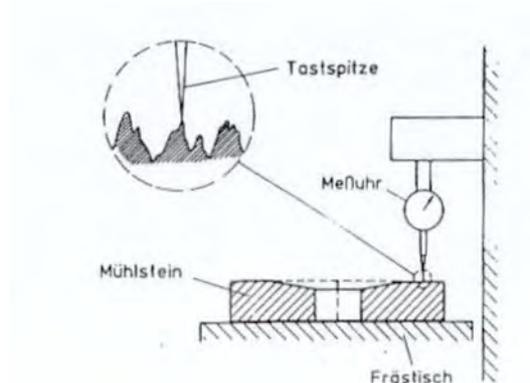


Bild 27. Versuchsaufbau zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit.

Ausgehend von der an der höchsten Profikuppe orientierten Bezugslinie wird die Strecke bis zum Aufsetzen der Messnadel auf der Oberfläche ermittelt. Die Vorspannung des Messwerkzeuges beträgt dabei 0,05 N. Zur Messung wird auf der Mahlbahn in radialer Richtung eine Messstrecke zwischen Steinaußenkante und dem Schluck festgelegt. Die Abtastung erfolgt in Intervallen von jeweils 0,5 mm, so dass sich bei einer Gesamtmessstrecke von 75 mm ca. 150 Einzelwerte ergeben. Die Auswertung der erhaltenen Werte erfolgt nach DIN 4786 [104]. Dazu wird die Messstrecke  $1_m$  in fünf gleichgroße Bereiche  $1_e$  unterteilt und aus den in dieser Teilstrecke erhaltenen Werten jeweils die Einzelrautiefe  $Z$  entsprechend dem Abstand des höchsten zum tiefsten Punkt des Profils berechnet. Bild 28 zeigt die Begriffsbestimmung bei der Ermittlung der Einzelrautiefen  $Z_1 - Z_5$ .

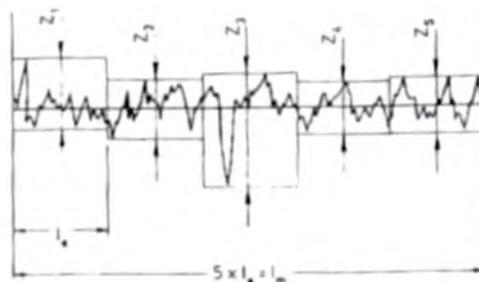


Bild 28. Ermittlung der Einzelrautiefen  $Z_1 - Z_5$ .

Die weitere Auswertung erfolgt gemäß DIN 4768 [104] durch die Angabe der gemittelten Rautiefe  $R_Z$  als arithmetisches Mittel der Einzelrautiefen  $Z_1 - Z_5$ . An jedem Steinpaar werden an verschiedenen Stellen insgesamt 4 Messreihen aufgenommen und wiederum der Mittelwert gebildet. Tabelle 11 zeigt die erhaltenen Ergebnisse.

Tabelle 11. Gemittelte Rautiefe  $R_Z$  in mm bei verschiedenen Mühlsteinen.

Material	Korund	Basalt	Quarz	Granit	Marmor	Korund/Quarz
----------	--------	--------	-------	--------	--------	--------------



Rz	1,26	1,18	1,33	<b>0,83</b>	<b>0,59</b>	1,16
----	------	------	------	-------------	-------------	------

Die gefundenen Werte entsprechen dem optischen Eindruck bei der Kontrolle der Mahlf lächen. **Der aus Marmorgranulat erstellte Mühlstein zeigt eine glattgeschliffene Oberfläche, bei der keine Kornkanten aus der Mahlbahn ragen. Ein ähnlicher Eindruck ergibt sich beim Granitstein. Die aus harten Materialien gefertigten Steine zeigen dagegen wie auch der Korund/Quarzstein eine raue Oberfläche, aus der zahlreiche Kanten des Granulates herausragen.** Die Messergebnisse der Rauigkeitsuntersuchungen bestätigen dies deutlich und korrespondieren mit den Werten des spezifischen Energiebedarfs  $W_{\text{spez}}$ , indem die Steine mit höherer Oberflächenrauigkeit bei den Mahlversuchen einen niedrigeren Energiebedarf benötigten. Es bestätigt sich die Vermutung, dass die aus der Mahlbahn ragenden Granulatkörner als Schneidkanten wirken. **Ähnlich dem Schnitvorgang kann durch die lokal eng begrenzte Beanspruchung der Getreidekörner schon mit relativ geringer Kraft ein Bruchvorgang eingeleitet werden. Für eine energiesparende Zerkleinerung sollten daher Mahlsteine mit rauen Oberflächen eingesetzt werden.** (Hervorhebungen durch W.Mock)

#### 6.2.3 Einfluss auf die Korngrößenverteilung des Mahlproduktes

**(gemeint wird hier die Feinheit W.M.)**

Mit Hilfe der Rückstandssummenkurve soll die Korngrößenverteilung der erhaltenen Mahlprodukte bewertet werden. **Mit den Marmor- und Granit-Mühlsteinen wird der angestrebte Feinheitsgrad nicht erreicht, so dass diese Analyseenergebnisse nicht in den Vergleich mit einfließen können.**

Während die aus Korund und Quarz gefertigten Steine identische Ergebnisse liefern, weicht die Korngrößenverteilung des mit dem Basaltstein ermahlenden Schrot ab. Bei fast gleichem Rückstandswert  $R_{>355\mu\text{m}}$  ist der Anteil grober und sehr feiner Kornfraktionen etwas höher. Die Differenz der einzelnen Siebrückstände zu den Vergleichswerten der anderen Mühlsteine liegt bei maximal 4 %. Derlei geringe Abweichungen üben jedoch nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des erhaltenen Mahlproduktes aus [14].

...

#### 6.2.4 Wärmeentwicklung

Bei einem wärmeempfindlichen Nahrungsmittel wie Getreide stellt die Temperatur während der Vermahlung einen wichtigen Einflussfaktor auf die Produktqualität dar. Die Eignung der verschiedenen Mühlsteine soll daher anhand der Wärmeentwicklung auf der äußeren Mahlbahn untersucht werden. Da die Versuche zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit entsprechenden abweichenden Umgebungstemperaturen durchgeführt wurden, erfolgt die Auswertung als Temperaturerhöhung  $\Delta T$ . Tabelle 13 zeigt die Zusammenstellung der bei der Vermahlung auf der äußeren Mahlbahn (Mess-

punkt TIR 2) aufgetretenen Temperaturwerte und die jeweils berechnete Temperaturerhöhung  $\Delta T$ .

Tabelle 13. Temperaturentwicklung der Versuchssteine aus verschiedenen Granulaten.

Material	Korund	Basalt	Quarz	Granit*	Marmor*	Korund/Quarz
	51	55	45	55	105	42
	29	27	21	19	18	19
$\Delta T$ K	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>36</b>	<b>87</b>	<b>32</b>

\*vorgegebener Feinheitsgrad wurde nicht erreicht

Die Werte der Temperaturerhöhung  $\Delta T$  liegen bei den Mühlsteinen aus den härteren Granulaten am niedrigsten und weisen auf eine besonders schonende Vermahlung hin. Diese Steine haben bereits in der Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs  $W_{\text{spez}}$  ein vorteilhaftes Betriebsverhalten gezeigt und können damit als besonders geeignet angesehen werden. **Die aus weicheren Gesteinen gefertigten Mühlsteine erreichen den vorgegebenen Feinheitsgrad nicht und bewirken trotzdem eine besonders hohe Temperaturbelastung des Mahlgutes.** Besonders auffällig sind die Werte bei Marmor. Die Temperatur überschreitet die 100° C Grenze und der Stein zeigt nach dem Versuch Brandspuren. Hier ist mit einer massiven Qualitätsbeeinträchtigung des Mahlgutes zu rechnen. **Derlei weiche Materialien sind demnach für die Fertigung von Mühlsteinen als vollkommen ungeeignet anzusehen.**

## 6.2.5 Bestimmung der optimalen Granulatgröße

Bislang wurde für alle Versuche die Granulatgröße der Sortierung 1,5/2,5 mm verwendet. Durch ergänzende Untersuchungen soll ermittelt werden, ob durch eine andere Körnunggröße eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfs zu erreichen ist. Dazu werden weitere Mühlsteine aus Korundgranulat der Größensortierung 1,0/1,4 mm und 2,8/4,0 mm gegossen. Die Versuchsdurchführung erfolgt in Übereinstimmung mit den bisherigen Untersuchungen. Tabelle 14 zeigt die Zusammenstellung der Messwerte.

Tabelle 14. Spezifischer Energiebedarf  $W_{\text{spez}}$  in kWh/dt der Mühlsteine auf Korundgranulaten verschiedener Größe bei unterschiedlichem Drehzahlen.

Granulatgröße	mm	1,0/1,4	1,5/2,5	2,8/4
N = 500	min <sup>-1</sup>	1,58*	1,46	1,88*
N = 750	min <sup>-1</sup>	1,74*	1,57	2,16
N = 1000	min <sup>-1</sup>	1,88*	1,65	2,45*

\* vorgegebener Feinheitsgrad wurde nicht erreicht

Der Einfluss der Granulatgröße auf den Vermahlungsprozess ist erheblich. **Mit den Mühlsteinen aus größerem und aus feinkörnigerem Material kann der vorgegebene Feinheitsgrad nicht oder nur knapp erreicht werden. Der spezifische Energiebedarf liegt trotzdem bei allen untersuchten Betriebsdrehzahlen höher.** Besonders ungünstig sind die Verhältnisse beim Steinpaar aus grobkörnigem Gra-

nutat. Um mit diesen Mühlsteinen überhaupt eine deutliche Zerkleinerung zu erreichen, muss der Mahlpalt stark verengt werden. Durch die erhöhte Reibung der Steinoberfläche aufeinander kommt es zu einer so starken Beanspruchung der Mahlbahn, dass einzelne Granulatkörner aus dem Mühlstein ausbrechen. Insgesamt zeigen die erhaltenen Resultate deutlich, dass eine Änderung der gewählten Granulatgröße das Arbeitsergebnis ausschließlich nachteilig beeinflusst.

### 6.3 Einfluss einer fehlerhaften geometrischen Gestaltung der Mühlsteine

Bei den bislang durchgeführten Versuchen wurde die Geometrie der Mühlsteine entsprechend den theoretischen Erkenntnissen gestaltet und konstant gehalten. Eine Vielzahl von in der Literatur beschriebenen und in der Praxis beobachtbaren Mahlsteingeometrien entspricht nicht diesen Vorgaben. Im Folgenden soll nun die Relevanz einer abweichenden geometrischen Form einzelner Elemente auf den spezifischen Energiebedarf bei der Vermahlung untersucht werden. Als Referenz dienen dabei die Messwerte des Mhlsteins aus Quarzgranulat bei einer Betriebsdrehzahl  $n = 750 \text{ min}^{-1}$ .

**Aus dem gleichen Material werden weitere Mahlsteine angefertigt und jeweils einzelne Veränderungen der Geometrie vorgenommen.**

Tabelle 15. Spezifischer Energiebedarf und Temperaturerhöhung  $\Delta T$  bei abweichender geometrischer Gestaltung der Mühlsteine.

Untersuchte Eigenschaft	Vorgenommene Veränderung	$W_{\text{spez}}$ KWh/dt	$\Delta T$ K
Referenzwert Quarzstein		1,57	24
Mangelnder Einzug in den Mahlpalt	Quadratische Luftfurche	2,91*	45
Fehlende Austragskraft $F_A$	Gerade Schärfe ohne Zugkreis ...	1,74	28
Nach innen gerichtete Austragskraft $F_A$	Furchen schneiden sich am Steinrand ...	1,96	34
Erhöhte Austragskraft $F_A$	Bogenschrfe	1,71	26,5
Reduzierte Mahlbahnflche	Mahlbahnbreite halbiert	1,66	25

\*vorgegebene Durchsatzmenge wurde nicht erreicht

*(Es ist deutlich zu sehen, dass ungünstige Steingeometrien trotz gleichen Materials des Mahlwerks bis fast doppelt soviel Energie benötigen und die Temperatur um bis zu 21 Grad stärker ansteigen kann. Mühlen mit solchen ungünstigeren Geometrien brauchen deshalb für die gleiche Mahlleistung stärkere Motoren!! W.M.)*

...



Die vorliegenden Versuchsergebnisse bestätigen die theoretischen Annahmen zur optimalen geometrischen Gestaltung der Mühlsteine. Insbesondere die Furchenquerform, die den Einzug des Getreides in den Mahlpalt erst ermöglicht, hat einen erheblichen Einfluss auf die Arbeitsweise der Steinscheibenmühle. Bei der Gestaltung der Schärfe ist die Richtung der Austragskraft  $F_A$  entscheidend, wenn ein niedriger spezifischer Energiebedarf und eine geringe Temperaturbelastung des Mahlgutes erreicht werden soll.

...

*(Auch die Getreideauswahl spielt eine große Rolle auf den Energieverbrauch und die Erwärmung. So erwärmt sich bei sonst gleichen Bedingungen die harte Weizensorte Greif um ca. 6 Grad C mehr als die weiche Weizensorte Ares. Wie gesagt, der Härteunterschied zwischen Mahlwerk und Mahlgut spielt bei sonst gleichen Bedingungen eine entscheidende Rolle. W.M.)*

Literaturauswahl zum Thema:

[1] BARGEL, Was treibt die Mühlen an?. Entwicklung und ländlicher Raum 24 (1990) Nr.4, S23/25.

[2] METZLER, R. u. K SCHARMER: Regenerative Energiequellen zum Antrieb kleine Mühlen. GATE-Dokumentation. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, 1984

[3] Technology for women. Terminal Report. Institute for Agricultural Research. Samaru Ahmabu Bello University, Zira (Nigeria), 1992

[4] SCHNEEWEIß, R.: Die heutigen Verzehrungsgewohnheiten von Getreide und die Deckung des Bedarfs in der Welt. Die Mühle und Mischfuttertechnik 103 (1966) Nr.23, S.385/386; 103 (1966) Nr.24, S. 402/403; 103 (1966) Nr.26, S.443/444; 103 (1966) Nr.27, S.454/455.

[5]HÖFFL, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Springer Verlag, Berlin, Hamburg, 1986.

[6] RUMPF, H.: Mechanische Verfahrenstechnik, Hanser Verlag, München, Wien 1975

[7] DIALER, K.: Grundzüge der Verfahrenstechnik und Reaktionstechnik. Hanser Verlag, München, Wien, 1986.

[8] HEMMING, W.: Verfahrenstechnik. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1989.

[9] LAUER, O.: Trocken-Mahlverfahren in der Lebensmitteltechnik. Die Mühle und Mischfuttertechnik 114 (1977) Nr.25, S.374/378; 114 (1977) Nr.26, S.389/392.



[10] PALLMANN, H.: Zerkleinerungstechnik im Bereich der Nahrungs- und Genussmittelindustrie. Die Mühle und Mischfuttertechnik 114 (1977) Nr.19, S.270/274.

[11] ZWINGELBERG, H., W. SEIBEL u. H. STEPHAN: Einfluss der Zerkleinerung von Weizen und Roggen auf das Backergebnis von Vollkornmahlerzeugnissen. Die Mühle und Mischfuttertechnik 121 (1984) Nr.17/18, S.224/232.

[12] PHILIPP, H.: Einführung in die Verfahrenstechnik. Otto Salle Verlag, Frankfurt/M., Berlin, München, 1980.

[13] MOY, C.: Die mechanische Aufbereitung in der Mischfutterherstellung. Die Mühle und Mischfuttertechnik 116 (1979) Nr.49, S.679/682.