

# Energieeffizienz kleiner Hammermühlen beim Zerkleinern von Mais

*Ein nach der jüngsten Energiekrise in Brasilien verabschiedetes Gesetz verbietet den Einsatz von Maschinen mit ungünstigem energetischen Wirkungsgrad. In einem deutsch-brasilianischen Projekt wurden Energiekonsum und Mahlqualität von Hammermühlen beim Mahlen von Mais ermittelt. Zudem wurde die Gültigkeit von verschiedenen energetischen Kalkulationsmodellen untersucht. Der Einfluss von Durchsatz, Drehzahl und Sieblochdurchmesser auf den spezifischen Energieverbrauch bestätigt sich.*

Dr.-Ing. Volkhard Scholz ist Mitarbeiter im Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam (Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. Zasko); e-mail: vscholz@atb-potsdam.de. Prof. DS Gutemberg P. Dias ist Dozent am Institut für Landtechnik der Universität Visoca/Brasilien (UFV) und MSc Denilson E. Rodrigues Assistent dieser Universität. MSc Ronaldo F. Coelho ist Leiter der Abteilung Ländliche Elektrifizierung des Energieversorgungsunternehmens CEMIG in Belo Horizonte/Brasilien. Die Arbeiten wurden von der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ), dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und der brasilianischen Wissenschaftsstiftung (FAPEMIG) gefördert.

Referierter Beitrag der **LANDTECHNIK**, die Langfassung finden Sie unter **LANDTECHNIK-NET.com**.

## Schlüsselwörter

Hammermühle, Energie, Mais, Korngröße

## Keywords

Hammer mill, energy, maize, particle size

## Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 02503 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

In südlichen Ländern ist Mais eines der wichtigsten Nahrungs- und Futtermittel. In Brasilien wird mehr als ein Viertel der Ackerfläche für den Maisanbau genutzt und darauf etwa 40 Mio. Tonnen Körnermais pro Jahr geerntet. Ein großer Teil wird von Klein- und Mittelbauern produziert, die das Korn überwiegend in Hammermühlen geringer Leistung mahlen. Bei diesem hierzulande unbekanntem Hammermühlentyp handelt es sich eigentlich um eine Kombination aus Hammermühle, Scheibenradhäcksler und Muser. Diese als *Desintegrador Picador Moedor (DPM)* bezeichnete Zerkleinerungsmaschine wird neben dem Mahlen und Schroten von Mais und Getreide auch zum Häckseln von Elefantengras und Silomais sowie zum Reiben von Maniok verwendet. Sie wird zurzeit von fast 30 inländischen Herstellern mit Antriebsleistungen zwischen 1,5 und 10 kW produziert.

Bei der Vielzahl der angebotenen Produkte ist es für den Landwirt außerordentlich schwierig, eine für seine Zwecke geeignete Maschine auszuwählen, insbesondere hinsichtlich Energie und Mahlqualität. Dem Energieverbrauch kommt in den ländlichen Regionen Brasiliens nicht erst seit der letzten Energiekrise besondere Bedeutung zu. Aufgrund der extremen Entfernungen sind hier die Leitungsquerschnitte eher unter- als überdimensioniert. Seitens des Staates und der Energieversorgungsunternehmen wird daher hoher Wert auf geringen und effizienten Elektroenergieeinsatz beim Verbraucher gelegt [1, 2].

## Messaufbau und -ablauf

Die untersuchten Hammermühlen DPM bestehen aus einem horizontalen Mahlwerk mit einem auf derselben Achse angeordneten Scheiben- und Flügelrad sowie einem Zyklon. Auf der Oberseite sind bis zu vier Schlagleisten und eine verschließbare Auswurföffnung für Häckselgut vorgesehen. Die Unterseite ist mit einem halbkreisförmigen auswechselbaren Sieb ausgestattet, das beim Häckseln durch ein geschlossenes Stahlblech ersetzt wird. Im Mahlbetrieb wird das Schrot unter dem Sieb abgesaugt und über ein Radialgebläse in den Zyklon gefördert. Beim Muser wird ein Blechschieber in dem Gehäuseboden geöffnet, so dass der Brei abfließen kann. Die wichtigsten technischen Daten gehen aus *Tabelle 1* hervor.

Die Hammermühlen werden von einem Assynchronmotor (3,75 kW; 3515 min<sup>-1</sup>) über eine auf einem separaten Gestell montierte Drehzahl-Drehmomenten-Messwelle angetrieben. Durch Austausch der Keilriemenscheibe am An- und Abtrieb der Messwelle wird die Drehzahl der Hammermühle in fünf Schritten verändert. Das Drehmoment wird mittels einer werkseitig kalibrierten Drehmomentenmesswelle (1000 Nm) und die Drehzahl mit einem induktiven Impulsgeber gemessen [3]. Beide Signale werden mit Hilfe eines Messumformers in eine analoge Spannung gewandelt und anschließend mit der zugehörigen Messsoftware registriert und dargestellt.

Tab. 1: Technische Daten der untersuchten Hammermühlen DPM

Table 1: Specification of the tested hammer mills DPM

Parameter		Mühle				
		1	2	3	4	5
Nennleistung	kW	3,75	5,63	3,75	3,75	3,75
Nenn Drehzahl	min <sup>-1</sup>	4000	3800	3000	3500	3600
Eigenmasse	kg	71	66	63	82	78
Schlagkreisdurchmesser	mm	275	235	295	285	295
Anzahl der Hammerpakete	-	4	2	2	4	4
Anzahl der Hämmer	-	20	10	12	20	12
Breite der Hämmer	mm	5,0	4,8	5,0	4,6	4,4
Siebbreite	mm	120	132	126	120	106
Sieblänge	mm	560	470	600	560	580
Siebfreiflächenanteil						
des Siebes Ø 0,8 (1,3) <sup>a</sup> mm	%	4,4	12,7 <sup>a</sup>	8,9 <sup>a</sup>	9,1	5,5
des Siebes Ø 3,0 mm	%	11,8	13,4	15,5	16,9	14,8
des Siebes Ø 4,5 (6,3) <sup>b</sup> mm	%	17,8	13,3	19,4 <sup>b</sup>	19,3	21,1
des Siebes Ø 10 mm	%	21,3	26,1	-	21,9	10,4

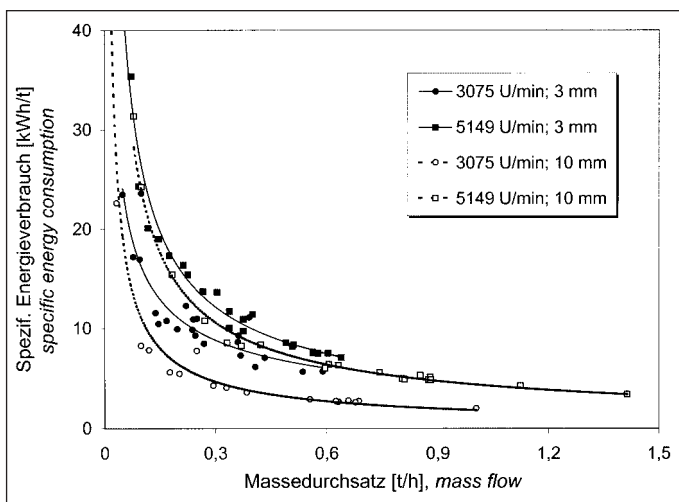


Bild 1: Spezifischer Energieverbrauch der Hammermühlen in Abhängigkeit vom Durchsatz für ausgewählte Drehzahlen und Sieblochdurchmesser

Fig. 1: Specific energy consumption of the hammer mills depending on mass flow for a selected number of revolutions and different sieve mesh

Für die Untersuchungen kam Körnermais (*Zea mays L*) aus brasilianischem Anbau zum Einsatz. Die Feuchte betrug im Mittel 11,5% und die Schüttdichte  $\sim 800 \text{ kg/m}^3$ . Der aus je drei Abmessungen gebildete mittlere Korndurchmesser betrug 8,12 mm. Bei jeder der fünf untersuchten Hammermühlen wurde jeweils für vier bis fünf Siebe von  $\varnothing 0,8$  bis 10 mm die Drehzahl in fünf Stufen von 3075 bis  $5149 \text{ min}^{-1}$  variiert und für jede Drehzahl der Durchsatz in der Regel in fünf Schritten verändert, so dass insgesamt etwa 500 Messungen durchgeführt wurden.

### Energieverbrauch

Die untersuchten Hammermühlen weisen eine streng lineare Abhängigkeit des Leistungsbedarfs vom Massedurchsatz auf, deren Nullpunkt durch die Leerlaufleistung und deren Anstieg durch den Sieblochdurchmesser und die Drehzahl  $n$  bestimmt wird. Daher ergibt sich folgerichtig ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen dem spezifischem Energieverbrauch und dem Massedurchsatz. Der Typ der Hammermühle ist in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung (Bild 1).

### Zerkleinerungsgrad

Die granulometrischen Parameter des Mehles werden wesentlich von Sieblochdurchmesser und Drehzahl der Hammermühle bestimmt. Der mittlere Endpartikeldurchmesser  $x_{50;E}$  beträgt etwa  $1/2$  bis  $1/15$  des Sieblochdurchmessers. Mit steigender Radialgeschwindigkeit nimmt er um 0,05 bis 0,20 mm je 10 m/s ab. Die Siebkennlinien sind überwiegend normalverteilt. Ein Vergleich mit zwei handelsüblichen in Brasilien hergestellten Maismehlen zeigt relativ gute Übereinstimmung mit den Siebkennlinien der Mehle, die mit einem 3 mm-Sieb bei mittleren Drehzahlen erzeugt wurden.

### Kalkulation und Bewertung

Für eine vergleichende Bewertung des spezifischen Energieverbrauchs  $W_{\text{spez}}$  ist die Bezugnahme auf den Sieblochdurchmesser eine grobe Vereinfachung. Maßgebend ist der erreichte Zerkleinerungsgrad des Materials. In der Literatur sind hierzu verschiedene Kalkulationsmodelle zu finden, die auf halbempirischen Ansätzen beruhen und sich jeweils auf die mittlere Anfangspartikelgröße  $x_{50;A}$  vor dem Zerkleinern und die Endpartikelgröße  $x_{50;E}$  nach dem Zerkleinern beziehen [4, 5], wie das Zerkleinerungsmodell nach Rittinger

$$W_{\text{spez}} = C_R \cdot \eta (1/x_{50;E} - 1/x_{50;A}) \quad (1)$$

nach Kick

$$W_{\text{spez}} = C_K \cdot \eta \log(x_{50;A}/x_{50;E}) \quad (2)$$

nach Bond & Wang

$$W_{\text{spez}} = C_B \cdot \eta (x_{50;A}/x_{50;E})^{1/4} / x_{50;E}^{1/2} \quad (3)$$

Werden auf der Grundlage der gewonnenen Messwerte und der Gleichungen (1) bis (3) Regressionsanalysen durchgeführt, kann das Produkt aus dem jeweiligen Materialkoeffizienten  $C$  und dem Wirkungsgrad  $\eta$  ermittelt werden. Es beträgt

$$C_R \cdot \eta = 5,01 \quad \text{für } R^2 = 0,55 \quad (4)$$

$$C_K \cdot \eta = 6,44 \quad \text{für } R^2 = 0,28 \quad (5)$$

$$C_B \cdot \eta = 3,06 \quad \text{für } R^2 = 0,46 \quad (6)$$

Mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,55$  ergibt sich für Partikeldurchmesser  $x_{50;E} > 0,36 \text{ mm}$  (Sieb- $\varnothing > 0,8 \text{ mm}$ ) die insgesamt beste Übereinstimmung von gemessenen und kalkulierten Werten nach dem Ansatz von Rittinger (Bild 2).

### Schlussfolgerungen

Der spezifische Energieverbrauch der untersuchten Hammermühlen liegt im Bereich von 2 bis über 50 kWh/t Körnermais. Er wird wesentlich von Sieblochdurchmesser, Durchsatz und Drehzahl bestimmt. Unter günstigen Betriebsbedingungen, also bei optimalen Drehzahlen und hohen Durchsätzen,

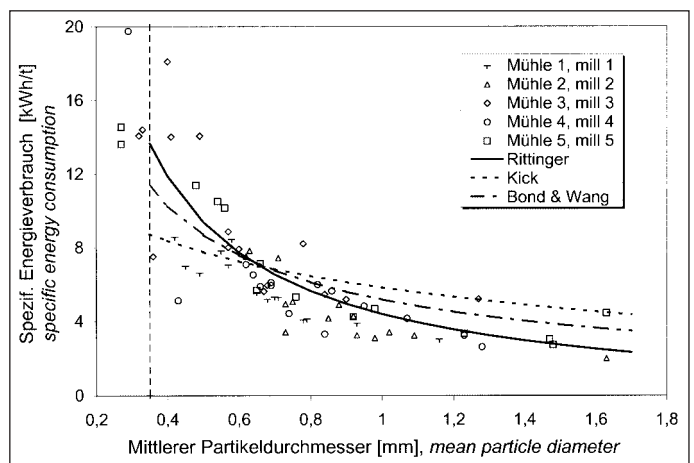


Bild 2: Minimaler spezifischer Energieverbrauch der Hammermühlen in Abhängigkeit vom Endpartikeldurchmesser für unterschiedliche Drehzahlen und Sieblochdurchmesser

Fig. 2: Minimum specific energy consumption of the hammer mills depending on mass flow for various revolutions and final particle diameters

werden bei Sieben mit einem Lochdurchmesser  $\geq 3 \text{ mm}$  in der Regel 12 kWh/t nicht überschritten und damit ähnliche Werte wie bei vergleichbaren europäischen Fabrikaten erreicht [6, 7, 8].

Die energetische Effizienz muss in Zusammenhang mit dem Zerkleinerungserfolg beurteilt werden. Für die Erzeugung eines Maismehls mit einem mittleren Partikeldurchmesser  $x_{50;E} \geq 1 \text{ mm}$  beträgt der spezifische Energieverbrauch der hier untersuchten Hammermühlen weniger als 6 kWh/t, wobei die einzelnen Mühlen konstruktiv bedingte Unterschiede aufweisen. Von den aus der Literatur bekannten Modellen zur Kalkulation des Energiebedarfs deckt sich der Ansatz von Rittinger [4, 5] am besten mit den Messergebnissen und kann daher zur Anwendung empfohlen werden.

Insgesamt gilt, dass die fünf untersuchten Hammermühlen DPM für den Einsatz in kleinbäuerlichen Betrieben gut geeignet sind und zwei davon in einem weiten Partikeldurchmesserbereich gute energetische Wirkungsgrade erreichen. Allerdings sollte entgegen der gängigen Praxis das Korn nicht mehr als erforderlich zerkleinert werden (mittlere Partikeldurchmesser von 0,5 bis 1,0 mm für die Schweinefütterung) [9, 10]. Da für die menschliche Ernährung meist ebensolche Korngrößen benötigt werden, sollten bevorzugt Siebe mit Lochdurchmessern  $\geq 3 \text{ mm}$  zum Einsatz kommen. Gegenüber dem derzeit überwiegend verwendeten 0,8 mm-Sieb verringert sich damit der spezifische Energieverbrauch um 20 bis 80 %.

Mit 3 mm-Sieben produzierte Mehle weisen ähnliche Partikelgrößenspektren wie handelsübliche Maismehle auf. Bei der Vermarktung derart produzierter Mehle ist allerdings zu beachten, dass diese im Gegensatz zu industriell hergestellten Maismehlen nur begrenzt lagerfähig sind, da Kleinproduzenten in der Regel keine Entkeimung des Korns vornehmen.