Energieeffizienz brasilianischer Hammermühlen beim Zerkleinern von Mais

Volkhard Scholz[1], Gutemberg Pereira Dias[2], Denilson Eduardo Rodrigues[2] und **Ronaldo Flora Coelho[3]**
[1] Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam
[2] Universidade Federal de Visoca (UFV), Visoca/Brasilien
[3] Compania Energética de Minas Gerais (CEMIG), Belo Horizonte/Brasilien

Ein nach der jüngsten Energiekrise in Brasilien verabschiedetes Gesetz verbietet die Herstellung und Vermarktung von Maschinen mit ungünstigem energetischen Wirkungsgrad. Im Rahmen eines deutsch-brasilianischen Projektes wurde daher ein Messstand errichtet und der Energiekonsum und die Mahlqualität von fünf brasilianischen Hammermühlen DPM beim Mahlen von Mais ermittelt und bewertet. Darüber hinaus wurde die Gültigkeit von verschiedenen aus der Literatur bekannten energetischen Kalkulationsmodellen untersucht. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss von Durchsatz, Drehzahl und Sieblochdurchmesser auf den spezifischen Energieverbrauch sowie dessen Abhängigkeit vom Zerkleinerungsgrad des Materials.

Schlüsselwörter
Hammermühle, Mais, Durchsatz, Energie, Siebkennlinie

Einleitung

In südlichen Ländern ist Mais eines der wichtigsten Nahrungs- und Futtermittel. In Brasilien werden ca. 12 Mio Hektar, also 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 unbekannten Hammermühlentyp handelt es sich im eigentlichen Sinne um eine Kombination aus Hammermühle, Scheibenradhäcksler und Muser. Diese als Desintegrador Picador Moedor (DPM) bezeichnete Zerkleinerungsmaschine wird neben dem Mahlen bzw. Schroten von Mais und Getreide auch zum Häckseln von Elefantengras und Silomais sowie zum Reiben von Maniok verwendet. Neben der Zuckerrohrpresse ist sie die mit Abstand verbreitetste Nacherntemaschine in der brasilianischen Landwirtschaft. Sie wird zur Zeit von fast 30 inländischen Herstellern mit Antriebsleistungen zwischen 1,5 und 10 kW, in Ausnahmefällen bis zu 22 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 besondere Bedeutung zu. Aufgrund der extremen Entfernungen sind hier die Leitungsquerschnitte eher unter- als überdimensioniert. Seitens der Energieversorgungsunternehmen wird daher besonderer Wert auf geringen und effizienten Elektroenergieeinsatz beim Verbraucher gelegt [1]. Außerdem wurde nach der letzten Energiekrise im vergangenen Jahr ein Gesetz erlassen, dass die Herstellung, Einfuhr und Verwendung von Maschinen und Ausrüstungen mit hohem energetischen Wirkungsgrad zwingend vorschreibt [2]. Und die Mahlqualität ist entscheidend für die Vermarktung des Maismehls, das in ländlichen Regionen vielfach auch für die menschliche Ernährung verwendet wird. Insofern wird durch Identifizierung leistungsfähiger Hammermühlen auch ein gewisser sozioökonomischer Beitrag für Kleinbauern geleistet.
Da in Brasilien trotz früherer von der Bundesrepublik Deutschland unterstützter Aktivitäten keine landtechnische Prüfstelle besteht, die eine Gebrauchswertprüfung der angebotenen Hammermühlen durchführen könnte, wurden im Rahmen eines deutsch-brasilianischen Gemeinschaftsprojektes ein Messstand errichtet und der Energiekonsum und die Mahlqualität von fünf der verbreitetsten brasilianischen Hammermühlen DPM beim Mahlen von Mais ermittelt und bewertet. Darüber hinaus wurde die Gültigkeit von verschiedenen aus der Literatur bekannten Zerkleinerungsmodellen untersucht.
Die für die Untersuchungen erforderliche Messeinrichtung wurde von der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH Eschborn (GTZ) und dem brasilianischen Energieversorgungsunternehmen CEMIG Belo Horizonte finanziert. Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der gemeinsamen Messungen des Instituts für Agrartechnik der Universität Visoca (UFV) und des Instituts für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB) wurden vom Deutschen Akademischen Austauschdienst Bonn (DAAD) und der brasilianischen Wissenschaftsstiftung des Staates Minas Gerais (FAPEMIG) gefördert.

Material und Methoden

Messaufbau

Die untersuchten Hammermühlen DPM haben prinzipiell den gleichen Aufbau. Sie bestehen aus einem horizontalen Mahlwerk mit einem auf derselben Achse angeordneten Scheiben- und Flügelrad sowie einem Zyklon. Das Gehäuse ist aus Stahlblech gefertigt und besitzt seitlich eine Zulauföffnung, an die eine Schurre und ein Fülltrichter mit Dosierschieber angeflanscht sind. Auf der Oberseite sind bis zu 4 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, wo es abgeschieden und in dem darunter befindlichen Sack aufgefangen wird. Beim Musen wird ein Blechschieber auf dem Gehäuseboden geöffnet, so dass der Brei abfließen kann (**Bild 1**).
Das Hammerwerk besteht aus der Häckselscheibe und einer Gegenscheibe mit dazwischen auf 2 oder 4 Achsen angeordneten Hammerpaketen zu je 3 bis 6 Einzelhämmern. Der äußere Schlagkreisdurchmesser beträgt 235 bis 295 mm. Der

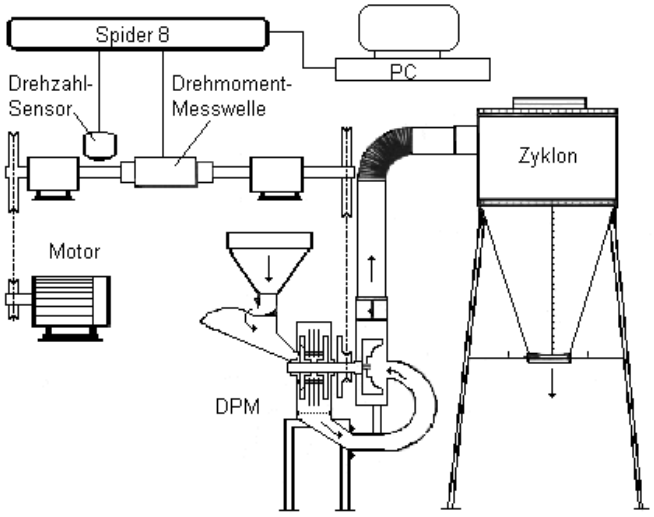

Bild 1: Prinzipieller Aufbau des Messstandes

Antrieb erfolgt jeweils über ein Keilriemenpaar, wobei für den Mahlbetrieb je nach Maschinentyp eine Antriebsleistung von 3,75 bis 5,63 kW und eine Nenndrehzahl von 3000 bis 4000 U/min empfohlen wird. Die übrigen technischen Daten gehen aus folgender Tabelle hervor (**Tabelle 1**).

Die zu untersuchenden Hammermühlen werden von einem Assynchronmotor (3,75 kW; 3515 U/min) 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 5 Schritten verändert.

Das Drehmoment wird mittels der werkseitig kalibrierten Drehmomentenmeßwelle T4A (1000 Nm) der Fa. Hottinger Baldwin GmbH Darmstadt gemessen und die Drehzahl mit einem induktiven Impulsgeber, der unmittelbar über der Welle befestigt ist. Beide Signale werden mit Hilfe des Meßumformers Spider 8 in eine analoge Spannung gewandelt und anschließend mit der zugehörigen Meßsoftware registriert und dargestellt. Die Meßfrequenz für beide Größen beträgt 2 Hz.

Meßablauf

Für die Untersuchungen kam Körnermais aus brasilianischem Anbau zum Einsatz *(Zea mays L)*. Die Feuchte betrug im Mittel 11,5 % und die Schüttdichte ca. 800 kg/m^3. Der von 200 Einzelkörnern aus je 3 Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) gebildete mittlere Korndurchmesser betrug 8,12 mm, mit einer Standardabweichung von 1,56 mm.

Bei den Versuchen wurde nach einer Anlaufzeit von ≥ 10 s eine vorgegebene Kornmasse in den Fülltrichter geschüttet und nach vollständigem Durchlauf des Gutes und einer gewissen Nachlaufzeit die Messung beendet. Mit dem Dosierschieber konnte schrittweise ein Solldurchsatz vorgegeben werden, dessen Maximalwert vorher durch Probieren ermittelt wurde. Die effektive Meßdauer Δt wurde als Zeitspanne zwischen dem ersten und dem letzten gemessenen Maximalwert des Drehmomentes festgelegt. Aus der Meßdauer Δt und der aufgefangenen Gutmasse m wurde der Massedurchsatz $\dot{m} = m / \Delta t$ ermittelt. Das mittlere Drehmoment M_t und Drehzahl n wurde jeweils durch Bildung des arithmetischen Mittels über die Meßdauer Δt bestimmt (**Bild 2**).

Die Leistung und der spezifische Energieverbrauch wurden nach den Gleichungen (1) und (2) berechnet:

$$P = M_t * n * 2\pi / (60*1000) \quad (1)$$

$$W_{spez} = P / \dot{m} \quad (2)$$

mit

P [kWh]	-	Leistung
M_t [Nm]	-	Drehmoment
n [1/min]	-	Drehzahl
W_{spez} [kWh/t]	-	Spezifischer Energieverbrauch
$\dot{m}$ [t/h]	-	Massedurchsatz

Da die untersuchten Hammermühlen für Riementrieb vorgesehen sind, wurde der durch Schlupf und Biegeverformung der Keilriemen bedingte Leistungsverlust von ca. 3 % nicht berücksichtigt [3].

Neben Drehzahl, Drehmoment und Massedurchsatz wurde die Korngrößenverteilung

Tabelle 1: Technische Daten der untersuchten Hammermühlen DPM

Parameter	Einheit	Mühle 1	Mühle 2	Mühle 3	Mühle 4	Mühle 5
Nennleistung	kW	3,75	3,75 ... 5,63	3,75	3,75	3,75
Nenndrehzahl	U/min	4000	3800...4000	3000	3500	3600
Eigenmasse (ohne Zyklon)	kg	71	66	63	82	78
Max. Schlagkreisdurchmesser	mm	275	235	295	285	295
Anzahl der Hammerpakete	-	4	2	2	4	4
Breite des Hammerpaketes	mm	75	60	53	88	50
Anzahl der Hämmer	-	20	10	12	20	12
Breite der Hämmer	mm	5,0	4,8	5,0	4,6	4,4
Anzahl der Schlagleisten	-	4	2	2	4	4
Siebbreite	mm	120	132	126	120	106
Sieblänge	mm	560	470	600	560	580
Siebfreiflächenanteil						
des Siebes ∅ 0,8 (1,3[a]) mm	%	4,4	12,7 [a]	8,9 [a]	9,1	5,5
des Siebes ∅ 3,0 mm	%	11,8	13,4	15,5	16,9	14,8
des Siebes ∅ 4,5 (6,3[b]) mm	%	17,8	13,3	19,4 [b]	19,3	21,1
des Siebes ∅ 10 mm	%	21,3	26,1	-	21,9	10,4
Durchmesser des Flügelrades	mm	225	255	205	280	215
Breite des Flügelrades	mm	75	72	53	68	70
Durchmesser des Zyklons	mm	400	365	475	465	500
Höhe des Zyklons	mm	1000	1100	750	1200	1050

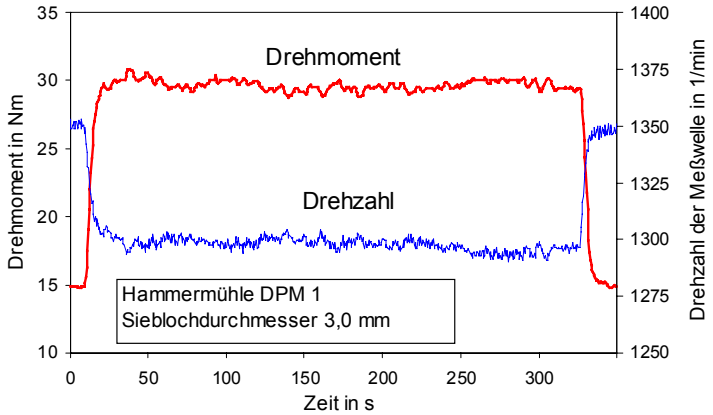

Bild 2: Typischer Drehmoment- und Drehzahlverlauf

lung ermittelt. Dies erfolgte mit einer Vibrationssiebeinrichtung des Typs Soiltest mit 6 Sieben der Maschenweite 0,149 bis 4,76 mm, wobei jeweils 200 g des zerkleinerten Materials bis zur Massekonstanz, mindestens jedoch 15 Minuten, gesiebt und mit einer elektronischen Tafelwaage (Δ = 0,1 mg) der jeweilige Siebrückstand gewogen wurde. Allerdings wurde hierbei vereinfachend jeweils eine Mischprobe aus Messungen mit unterschiedlichen Massedurchsätzen gebildet.

Bei jeder der fünf untersuchten Hammermühlen wurde jeweils für 4 bis 5 Siebe von ∅ 0,8 bis 10 mm die Drehzahl n in 5 Stufen von 3075 bis 5149 U/min variiert und für jede Drehzahl der Durchsatz $\dot{m}$ in der Regel in 5 Schritten verändert, so dass insgesamt 480 Messungen durchgeführt wurden.

Ergebnisse

Energiebedarf

Die untersuchten Hammermühlen weisen eine streng lineare Abhängigkeit des Leistungsbedarfs P vom Massedurchsatz $\dot{m}$ der Form

$$P = P_o + c\ \dot{m} \qquad (3)$$

auf, deren Nullpunkt durch die Leerlaufleistung P_o und deren Anstieg c durch den Sieblochdurchmesser und durch die Drehzahl n bestimmt wird (**Bild 3**). Daher ergibt sich folgerichtig ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen dem spezifischem Energieverbrauch W_{spez} und dem Massedurchsatz $\dot{m}$ und damit bei geringen Durchsätzen ein sehr hoher spezifischer Energieverbrauch. Der Typ der Hammermühle ist in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung (**Bild 4**).

Aufgrund der Abhängigkeit des maximal erreichbaren Durchsatzes vom Lochdurchmesser der verwendeten Hammermühlensiebe hat dieser ebenfalls Einfluß auf den spezifischen Energieverbrauch. Mit kleiner werdendem Durchmesser steigt der jeweils geringste, d. h. bei Maximaldurchsatz gemessene, spezifische Energieverbrauch progressiv an. Die Streuung der Werte bei ∅ 0,8 mm, dem kleinsten verwendeten Sieblochdurchmesser, ist im wesentlichen konstruktiv bedingt und u.a. darauf zurückzuführen, daß verschiedene Hammermühlentypen aufgrund unzureichender Abdichtung der Gehäuse bei dem extrem feinen Material keine exakte Massebestimmung ermöglichen (**Bild 5**).

Da die untersuchten Hammermühlen unter gleichen Bedingungen betrieben werden, kann der Einfluß verschiedener Konstruktionsparameter auf den spezifischen Energieverbrauch dargestellt werden, so z.B. der Einfluß der Drehzahl bzw. der Radialgeschwindigkeit.

Unter der Bedingung, daß die jeweilige Hammermühle mit dem technisch maximal möglichen Durchsatz betrieben wird, steigt für den größten verwendeten Sieblochdurchmesser ∅ 10 mm der spezifische Energiebedarf mit zunehmender Radialgeschwindigkeit (am äußeren Schlagkreisdurchmesser gemessen) stetig an. Das heißt, hier ist der Energieverbrauch bei niedrigen Radialgeschwindigkeiten < 40 m/s bzw. Drehzahlen < 3075 U/min am geringsten. Bei 3 mm-Sieben dagegen liegt das energetische Minimum bei etwa 50 bis 60 m/s für Mühlen mit 4 Hammerpaketen und bei > 60 m/s für Mühlen mit 2 Hammerpaketen (**Bild 6**).

Zerkleinerungserfolg

Der Zerkleinerungsgrad des Materials wird vor allem durch den Lochdurchmesser des eingesetzten Siebes und durch die

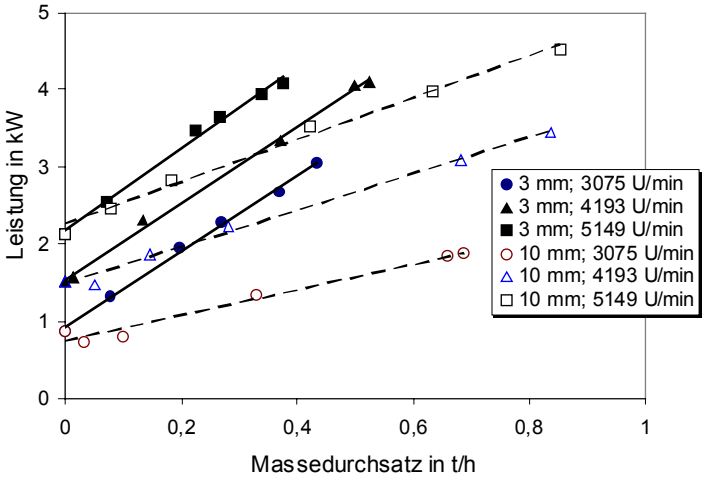

Bild 3: Leistungsbedarf der Hammermühle 1 in Abhängigkeit von Durchsatz, Drehzahl und Sieblochdurchmesser

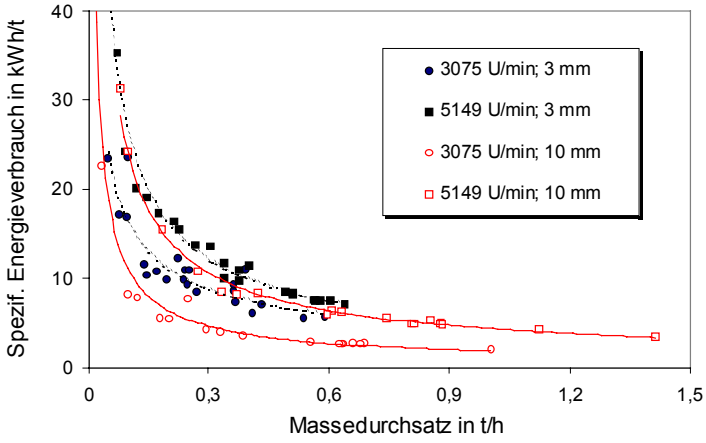

Bild 4: Spezifischer Energieverbrauch der Hammermühlen in Abhängigkeit vom Durchsatz für ausgewählte Drehzahlen und Sieblochdurchmesser

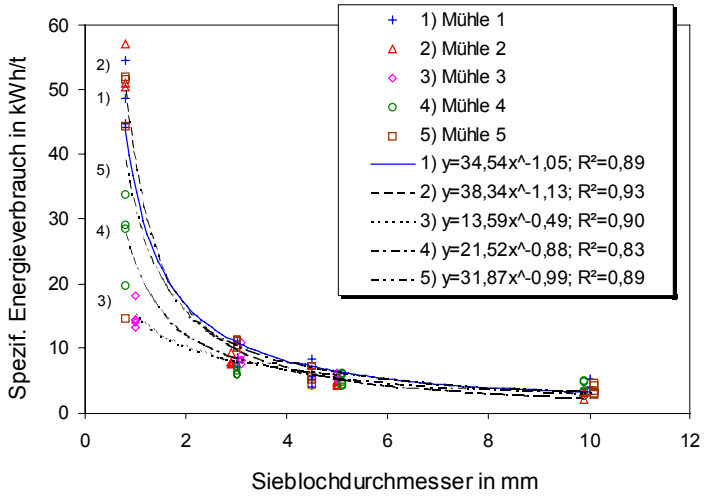

Bild 5: Spezifischer Energieverbrauch bei unterschiedlichen Drehzahlen und maximalem Durchsatz in Abhängigkeit vom Sieblochdurchmesser

Radial- bzw. Prallgeschwindigkeit bestimmt. Mit größer werdendem Sieblochdurchmesser nimmt der mittlere Endpartikeldurchmesser von $x_{50;E}$ =0,26...0,36 mm (∅ 0,8 mm) degressiv zu und erreicht bei ∅ 10 mm-Sieben Werte von $x_{50;E}$ = 0,6...1,5 mm. Gegenüber 3075 U/min verringert sich bei 5149 U/min der mittlere Partikeldurchmesser um bis zu 50 %; allerdings nur bei großen Sieblochdurchmessern ∅ 10 mm. Bei kleineren Durchmessern ist die Differenz deutlich geringer (**Bild 7**).

Die Siebkennlinien der in dieser Versuchsreihe anfallenden Mahlprodukte 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. Lediglich der Feinanteil < 0,15 mm ist mit ca. 5 bis 10 % etwas höher als bei industriell hergestellten Maismehlen.

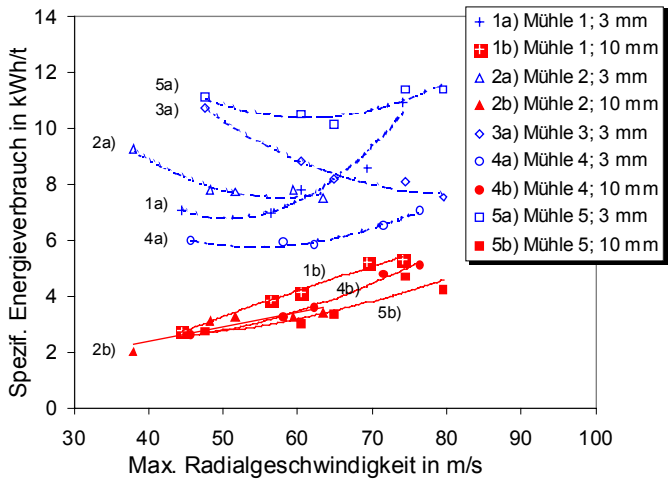

Bild 6: Spezifischer Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Radialgeschwindigkeit der Hämmer für ausgewählte Sieblochdurchmesser

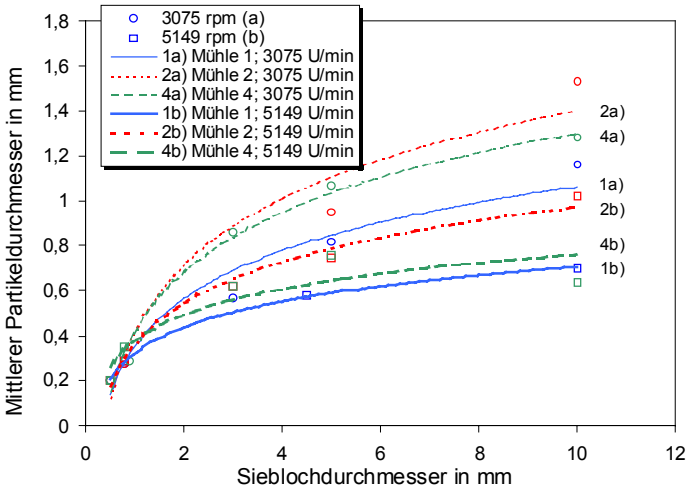

Bild 7: Endpartikelgröße in Abhängigkeit vom Sieblochdurchmesser für ausgewählte Hammermühlen und Drehzahlen

Kalkulation und Bewertung

Für eine vergleichende Bewertung des Energieverbrauchs 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

1. nach Rittinger

$$W_{spez} = C_R \cdot \eta \; (1/x_{50;E} - 1/x_{50;A}) \qquad (4)$$

2. nach Kick

$$W_{spez} = C_K \cdot \eta \cdot \log (x_{50;A} / x_{50;E}) \qquad (5)$$

3. nach Bond & Wang

$$W_{spez} = C_B \cdot \eta \, (x_{50;A} / x_{50;E})^{1/4} / x_{50;E}^{1/2} \qquad (6)$$

mit

W_{spez} [kWh/t]	-	Spezifischer Energieverbrauch
C [-]	-	Materialkoeffizient
η [-]	-	Wirkungsgrad
$x_{50;A}$ [mm]	-	Mittlere Anfangspartikelgröße
$x_{50;E}$ [mm]	-	Mittlere Endpartikelgröße

Die Koeffizienten C_R, C_K und C_B sind materialabhängig und müssen, soweit sie nicht bekannt sind, durch Messungen bestimmt werden. Der Wirkungsgrad η, der sich aus dem Verhältnis der Zerkleinerungsenergie für das Einzelkorn zum Energieverbrauch der Maschine ergibt, beträgt für Hammermühlen η = 0,25 ... 0,40 [4, 5].

Werden auf der Grundlage der gewonnenen Meßwerte und der Gleichungen (4) bis (6) Regressionsanalysen durchgeführt, kann das Produkt aus dem jeweiligen Koeffizienten C und dem Wirkungsgrad η ermittelt werden. Es beträgt

1. nach Rittinger (4)

$C_R \cdot \eta = 5{,}01$ für $R^2 = 0{,}55$ (7)

2. nach Kick (5)

$C_K \cdot \eta = 6{,}44$ für $R^2 = 0{,}28$ (8)

3. nach Bond & Wang (6)

$C_B \cdot \eta = 3{,}06$ für $R^2 = 0{,}46$ (9)

Bei Kenntnis des Wirkungsgrades können hieraus die entsprechenden Materialkoeffizienten C und somit verallgemeinerungsfähige Kalkulationsmodelle für den Energieverbrauch beim Zerkleinern von Mais gebildet werden. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}55$ ergibt sich die insgesamt beste Übereinstimmung von gemessenen und kalkulierten Werten nach dem Ansatz von Rittinger (10).

$$W_{spez} = 5{,}01 \, (1/x_{50;E} - 1/x_{50;A}) \qquad (10)$$

Die beiden anderen Modelle weichen insbesondere bei größeren Partikeldurchmessern von den mittleren Meßwerten ab. Allerdings sind hierbei die stark streuenden Werte für Sieblochdurchmesser ∅ 0,8 mm, d. h. für Partikeldurchmesser $x_{50;E} \leq 0{,}36$ mm, nicht berücksichtigt (**Bild 8**).

Schlußfolgerungen

Der spezifische Energieverbrauch der untersuchten Hammermühlen liegt im Bereich von 2 bis über 50 kWh pro Tonne Körnermais. Er wird im wesentlichen von Sieblochdurchmesser, Durchsatz und Drehzahl bestimmt. Unter günstigen Betriebsbedingungen, d.h. bei optimalen Drehzahlen und hohen Durchsätzen, werden bei Sieben mit einem Lochdurchmesser ≥ 3 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 $x_{50;E} \geq 1$ mm beträgt der spezifische Energieverbrauch der hier untersuchten Hammermühlen weniger als 6 kWh/t, wobei er konstruktiv bedingte Unterschiede aufweist und im Parti-

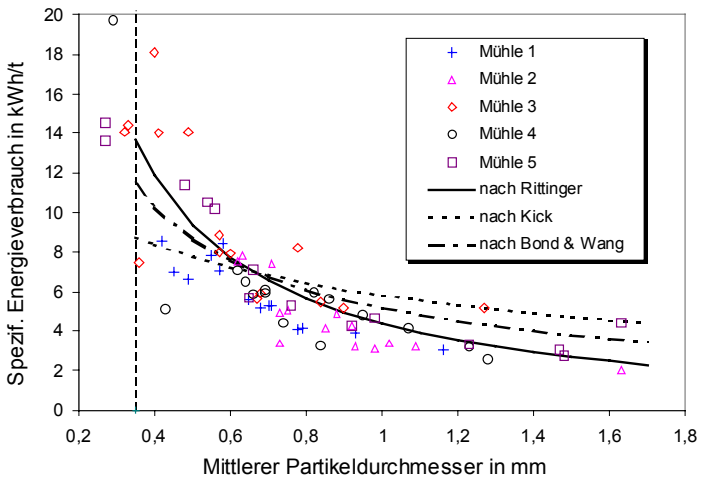

Bild 8: Minimaler spezifischer Energieverbrauch der Hammermühlen in Abhängigkeit vom Endpartikeldurchmesser für unterschiedliche Drehzahlen und Sieblochdurchmesser

keldurchmesserbereich $x_{50;E} \geq 0{,}36$ mm bei den Mühlen 1 und 2 am geringsten ist. Obwohl bei großen Sieblochdurchmessern (∅ 10 mm) der spezifische Energieverbrauch mit steigender Drehzahl bzw. Radialgeschwindigkeit zunimmt, verändert er sich bezogen auf den Partikeldurchmesser kaum, da dieser mit steigender Radialgeschwindigkeit abnimmt. Bei kleinen Sieblochdurchmessern (∅ 3 mm) hingegen weist er je nach Anzahl der Hammerpakete ab etwa 50 m/s ein Minimum auf. Das heißt, dass oberhalb dieser am Schlagkreisdurchmesser gemessenen Radialgeschwindigkeit, deren entsprechende Drehzahl überwiegend über den empfohlenen Nenndrehzahlen liegt, der spezifische Energieverbrauch sinkt.

Die granulometrischen Parameter des Mehles werden im wesentlichen von dem Sieblochdurchmesser und der Drehzahl der Hammermühle bestimmt. Die Korngrößen sind überwiegend normalverteilt. Der mittlere Endpartikeldurchmesser $x_{50;E}$ beträgt etwa 1/2 bis 1/15 des Sieblochdurchmessers (∅ 0,8 ... 10 mm). Mit steigender Radialgeschwindigkeit nimmt er um durchschnittlich 0,05 bis 0,20 mm je 10 m/s ab.

Von den aus der Literatur bekannten Modellen zur Kalkulation des Energiebedarfs von Rittinger, Kick und Bond & Wang [4, 5] deckt sich der Ansatz von Rittinger am besten mit den Meßergebnissen und kann daher zur Anwendung empfohlen werden. Die hierfür erforderliche Materialkonstante wurde ermittelt und angegeben.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die fünf untersuchten brasilianischen Hammermühlen DPM für den Einsatz in kleinbäuerlichen Betrieben gut geeignet sind und zwei davon in einem weiten Partikeldurchmesserbereich gute energetische Wirkungsgrade erreichen. Die geringe Anschlußleistung, die robuste Bauart und die Multifunktionalität dieser Maschine, die neben dem Mahlen von Getreide auch das Häckseln und Musen von anderen landwirtschaftlichen Rohprodukten erlaubt, lassen mit zunehmender Elektrifizierung der ländlichen Regionen weiterhin hohe Verkaufszahlen in Brasilien erwarten. Allerdings sollte entgegen der gängigen Praxis das Korn nicht mehr als erforderlich zerkleinert, also auf mittlere Partikeldurchmesser von 0,5 bis 1,0 mm für die Schweinefütterung orientiert werden [9, 10]. Da für die menschliche Ernährung meist ebensolche Korngrößen benötigt werden, sollten vorzugsweise Siebe mit Lochdurchmessern ≥ 3 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 mit Ausnahme des erhöhten Feinkornanteils ähnliche Partikelgrößenspektren wie handelsübliche Maismehle auf. Bei der Vermarktung derart produzierter Mehle ist allerdings zu beachten, dass sie im Gegensatz zu industriell hergestellten Maismehlen nur begrenzt lagerfähig sind, da Kleinproduzenten in der Regel keine Entkeimung des Korns vornehmen.

In weiterführenden Untersuchungen sollen verschiedene Konstruktionsparameter der Hammermühlen DPM verändert werden, um deren Einfluß auf Energieverbrauch und Zerkleinerungserfolg eindeutig nachweisen zu können. Darüber hinaus soll die Verschleißfestigkeit der Hämmer und der Siebe sowie einige ergonomische Parameter, wie Lautstärke und Staubentwicklung, ermittelt werden.

Literatur

[1] *Scholz, V. und G.P. Dias*: Rationeller Einsatz von Elektroenergie in der Landwirtschaft Brasiliens. In: Tagungsband VDI-Tagung Landtechnik 1998, Garching 15./16.10.98, S. 293-298

[2] Lei No. 10.2595: Dispoe sobre a Política Nacional de Conservacao e Uso Racional de Energia e dá outras providencias (Gesetz zur Einsparung und rationellen Verwendung von Energie). Brasilia 17.10.2001

[3] Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Hrsg. Beitz, W. und K.-H. Küttner, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1990

[4] *Höffl, K.*: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1985

[5] *Fürll, C., C. Idler und T. Hoffmann*: Untersuchungen zu Verfahren der Konservierung von erntefeuchtem, grobgeschrotetem Getreide. Agrartechn. Forschung 3 (1997)H.1, S.66-75

[6] DLG-Prüfbericht 2684: CRAMER-Hammermühle Mahl-Jet S. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft Frankfurt/M. 1978

[7] DLG-Prüfbericht 2731: CRAMER-Hammermühle Mahl-Fix U mit B-Antrieb. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft Frankfurt/M. 1978

[8] ZPL-Prüfbericht: Hammermühlenanlage GM 402 A02. Zentrale Prüfstelle für Landtechnik Potsdam-Bornim 1980

[9] *Fiedler, E.*: Versuchs- und Erfahrungsbericht 1985/86. Landesanstalt für Schweinezucht Forchheim, 1987

[10] *Zanotti, D.L., Nicolaiewsky, S., Ferriera, A.S., Guionio, A.L. und Lima G.J.M.*: Granulometria do milho na digestabilidade das dietas para suínos em crescimento e terminacao (Granulometrie von Mais in der Verdauung des Futters wachsender und ausgewachsener Schweine). Revista da Sociedade Brasiliera de Zootecnica, 24(1995)3, S. 428-436

Autoren

Dr.-Ing. Volkhard Scholz
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
Abteilung Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
Tel.: +49/(0)331/5699-312
Fax: +49/(0)331/5699-849
E-Mail: vscholz@atb-potsdam.de

Prof. DS Gutemberg Pereira Dias
Universidade Federal de Visoca (UFV)
Departamento de Engenharia Agrícola
36570-00 Visoca – MG / Brasil
Tel.: +55/(0)31/899-273
Fax: +55/(0)31/899-2735
E-Mail: gpdias@ufv.br

MSc Denilson Eduardo Rodrigues
Universidade Federal de Visoca (UFV)
Departamento de Fisica
36570-00 Visoca – MG / Brasil
Tel.: +55/(0)31/899-2994
Fax: +55/(0)31/899-2735
E-Mail: deduardo@mail.ufv.br

MSc Ronaldo Flora Coelho
Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)
Departamento de Comercializacao
Av. Barbacena, 1200
30190-131 Belo Horizonte – MG / Brasil
Tel.: +55/(0)31/3299-4499
Fax: +55/(0)31/3299-3982
E-Mail: rflora@cemig.com.br