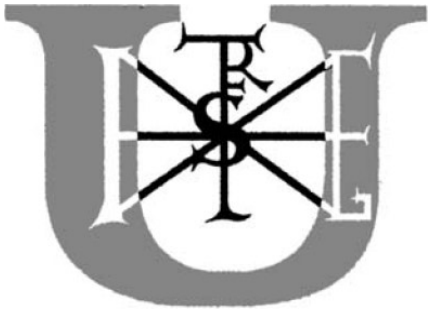


**Szent István Universität**

# Analyse von inneren Arbeitsprozessen von Feldhäcksler

These der Doktorarbeit

**Péter Kajtár**

Gödöllő, Ungarn
2010.

**Daten von der Doktorschule**

| | |
|---|---|
| **Benennung:** | **Doktorschule für Ingenieurwissenschaften** |
| **Wissenschaftszweig:** | **Landwirtschaftsingenieurwissenschaften** |
| **Leiter:** | Dr. István Farkas<br>Professor, der Doktor von Ungarischen Wissenschaftsakademie (MTA)<br>Sankt Stephan Universität, Fakultät für Maschinenbau, Institute für Umweltindustrielle Systemen |
| **Themenleitern:** | Dr. Péter Szendrő<br>Professor, der Doktor von Ungarischen Wissenschaftsakademie (MTA)<br>Sankt Stephan Universität, Fakultät für Maschinenbau, Institute für Mechanik und Maschinenkunde<br><br>Dr. Ingo Bönig<br>Konstrukteur<br>CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel |

..... .....

Genehmigung des Schulenleiters Genehmigung des Themenleiters

**Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung, Ziele ..... 4
2. Material und Methode ..... 7
2.1. Laboruntersuchungen ..... 7
2.1.1 Untersuchungsparameter, Ermittlung des Reibbeiwerts ..... 10
2.2. Feldversuche ..... 11
3. Ergebnisse und Auswertung ..... 13
3.1. Messungsergebnisse beim Silomaishacken ..... 17
3.2. Ergebnisse der Feldversuchen ..... 20
3.3. Berechnungsergebnisse von CFD-DEM ..... 21
3.4. Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 23
3.5. Neue wissenschaftliche Ergebnisse ..... 27
4. Konsequenzen und Vorschläge ..... 30
5. Zusammenfassung ..... 31
6. Publikations ..... 33
7. Dankesbezeigung ..... 34

# 1. Einleitung, Ziele

Häckslern ist eine der verbreiteten Grünfuttererntemethode, wo die ganze Pflanze – Mais oder Gras – auf gegebenen Länge verkleinert wird, dann wird gesammelt und geliefert zum Anwendungsort (am meisten wird eingesäuert). Die Technologie hat lange Vergangenheit, die in gleichem Alter als Getreideernte ist (SZENDRŐ, 1995). Am Anfang wurde dieses Prozess mit Messer und andere Schneidemittel durchgeführt, dann in dem XIX. Jahrhundert haben die erste stabile manuelle Häcksler erschienen, die später auch motorisiert wurden. Mit der Technologienentwicklung am Anfang des XX. Jahrhunderts sind die gezogenen Häcksler mit Maschinenantrieb erschienen, denen Flächenleistung und Durchflussfähigkeit noch niedrig war. In den 70'-ern von letztem Jahrhundert sind die erste mobile Häcksler (GRABERS und FRERICHS, 2001). Die ersten Muster wurden noch mit geringer Motorenleistung ausgestattet (60-80 PS) und waren fähig für Ernte von ein oder zwei Reihen. Mit der Technologienentwicklung wurde denen Durchflussfähigkeit, Motorenleistung und damit in Zusammenhang die Erntereihenfähigkeit auch erhöht. Dank dieser Entwicklung sind heute schon Häcksler mit 400t/h Durchflussfähigkeit erreichbar. Die Häcksler haben heutzutage immer mehr Aufgabe, weil die nicht mehr nur in Tierfutteraufbereitung eine herausragende Rolle spielen. Im Bezug auf die immer erhöhten Anforderungen des Umweltschutzes spielen diese Maschinen wichtige Rolle in Grundmaterialvorbereitung für Biogasherstellung (Verkleinerung von Energiewälder, Energiegras, Mais oder andere landwirtschaftliche Nebenprodukte).

Um die immer steigenden Ansprüche erfüllen zu können die Häcksler müssen während gegebener Zeit immer mehr Produkt verkleinern und das bedeutet große Beanspruchung an die Einzelteile. Die Konstrukteure streben sich je einfachere Lösungen zu finden, um die Durchflussleistung neben geringerem Energieaufwand erhöhen zu können. Trotzdem die physischen Grenzen können nicht übergeschritten werden. Es gibt manche ausgezeichnete technische Lösung für Durchflussleistungserhöhung ohne dass die eingeführte Energie steigern wurde, aber dazu musste die Häckslerenergie erhöht werden. Danach sind die Maschinen mit 700-800 PS Motorenleistung auf die Welt gekommen und die KRONE Häcksler erstmal mit Doppelmotoren und 1000 PS Motorenleistung. Die Häcksler mit Doppelmotoren haben viel mehr bessere spezifische Werte als die von Einzelmotoren, aber trotzdem deren Materialflussverlust mit über 400t/h Durchflussfähigkeit zweifelhaft geblieben ist. Es gibt immer Verluste, weil es um Produktverkleinerung und dessen Weiterlieferung geht, deswegen müssen denen Größe und Reduktionsmöglichkeiten übergedacht werden. Produktverkleinerung und Produktlieferung kostet Energie, aber es wurde mehrere sinnreiche Lösung für

Verkleinerungsenergiereduktion geboren. Leider daneben wurden die Abfuhrverluste im Hintergrund gedrängt, die aber bei höherem Durchfluss nicht mehr vermeiden darf, weil es parallel Mehrbedarf an Energie und Kraftstoff bedeutet. Als der Kraftstoffverbrauch von einem modernen Häcksler auf 160 l/h (!) beträgt, allein die 5-10% Verlustreduktion kann bedeutend Energie- und Kraftstoffersparnis bringen.

Das Hauptziel meiner Arbeit ist Forschung an den Reduktionsmöglichkeiten von inneren Energie- und Produktslieferungsverluste von einem Häcksler, damit die zukünftigen Häcksler neben wenigem Kraftstoffverbrauch mehr Massenströmungsleistung haben können. Deswegen wurden die Verlustquellen in einem Häcksler in Bezug auf reibungsbeeinflusste Strömungsprozesse untergesucht.

**Das Ziel der Forschungsarbeit**

In meiner Forschung habe ich die Verlustquellen in den Materialfluss von einem Häcksler untergesucht.

In meiner Arbeit habe ich gezielt, die Verlustquellen und denen Größe in einem Häcksler aufnehmen, und Vorschläge für einem effizienten Betrieb zu geben. Der Verlust stammt aus Beschleunigung während der Lieferung, weil das Produkt auf 50 m/s Geschwindigkeit aufschleudern muss. Weitere Verlustquelle bedeutet der Aneinanderstoß, ungeeignete Strömungsbedingungen und mit großer Bedeutung die Reibung. Das verkleinerte Produkt fließt durch einen Kanal neben ständigem Kontakt mit der Nebenwand. Deswegen die Wandreibung ist bedeutend und das Produkt verliert aus seiner kinetischen Energie. In meiner Forschung habe ich auf die Bestimmung und Reduktion von der Reibungsverlust einen besonderen Akzent gelegt, so ist es Möglich, die Verluste von diesen Maschinen zu mindern, und die effiziente Leistung zu vergrößern.

Verwirklichungsstrategie von vorgesteckten Zielen:

1.: Bestimmung von theoretischen Reibungsverlustgröße bei jedem Einzelteil. Auf diesem Grund Vorschläge für Konstruktionsverbesserungen, um diese Reibung vermindern zu können.

2.: Laboratoriumsuntersuchungen durchzuführen. Entwicklung von einem geeigneten Messgerät für Reibbeiwertmessung von verkleinertem Produkt. Messungen mit verschiedenen Einstellungen durchzuführen. Bestimmung des Einflusses von Bewegungsgeschwindigkeit, Belastungsgröße, Material der Reibungsfläche, Schnittlänge, Oberflächenrauchigkeit und Produktfeuchtigkeit

auf dem Reibbeiwert. Messungen werden sowohl mit verkleinertem Gras als auch mit Silomais durchgeführt.

3.: Durchführung von Feldversuche mit verschiedenen Einstellungen und Konstruktionsänderungen.

4.: Entwicklung von einem Simulation für Modellierung von inneren Förderprozess, damit die Geschwindigkeit- und Druckgegenstände auch in solchen Orten untergesucht werden kann, wo es mit der Messung unmöglich wäre.

# 2. Material und Methode

## 2.1. Laboruntersuchungen

### Das Messgerät

Es gibt mehreren Möglichkeiten zu den Reibbeiwertmessen. Bei der Auswahl muss auch das Stoffpaarung, Belastung und Bewegungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Nach der DIN gefertigte Messgeräte stehen auch für diesen Zweck zur Verfügung, aber denen Verwendungsbedingungen sind abweichend. Vorteile und Nachteile von dieser Untersuchungsart sind in Tabelle 1. zusammengefasst.

**Tabelle 1.: Vorteile und Nachteile von Reibungswiderstandsmessungen**

| | Vorteil | Nachteil |
|---|---|---|
| Eben | Gleichmäßige Geschwindigkeits-Verteilung; | Begrenzte Geschwindigkeitsbereich; |
| | Gleichmäßige Druckverteilung; | Begrenzter Reibungsweg; |
| | Einfache Oberflächengestalt; | |
| Band | Kontinuierliche gleichmäßige Geschwindigkeits-Verteilung | Es kann nicht bei jeder Reibungsoberfläche genutzt werden; |
| | Gleichmäßige Druckverteilung; | Eventuelle Oberflächenwellen; |
| Walze | Kontinuierliche gleichmäßige Geschwindigkeits-Verteilung; | Es kann nicht bei jeder Reibungsoberfläche genutzt werden; |
| | | Ungleichmäßige Druckverteilung; |
| Scheibe | Gut ausgebildete kontinuierliche Reibungsoberfläche | Ungleichmäßige Geschwindigkeits-Verteilung;; |
| | Gleichmäßige Druckverteilung; | |

Das Messen von Reibbeiwert der verkleinerten Grünfutter ist keine einfache Aufgabe, weil in diesem Fall der eine Reibungsstoff ein Haufen ist, und der andere ist eine Fläche. Daneben sowohl die breite Geschwindigkeitsbereich als auch die maximale Geschwindigkeit von 40 m/s komplizieren diese Untersuchung. So eine schnelle Verschiebung kann am

einfachsten durch eine Scheibenverwendung hergestellt werden. Obwohl es gibt etwas Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Innen- und Außenradius wegen der Scheibenform, die ist zu den untergesuchten Bereich unbedeutend. Das Messen von der gleichmäßigen Druckverteilung ist viel mehr wichtiger in dieser Untersuchung.

Nach der Berücksichtigung der oben genannten Fakten habe ich neben der Scheibenausbildung entschieden. Dessen Funktionsprinzip ist ähnlich an der Scheibenbremse, wo der Bremsbelag selbst das Hacken ist. Das durch mich geplante Messgerät ist in Abb. 1 zu sehen.

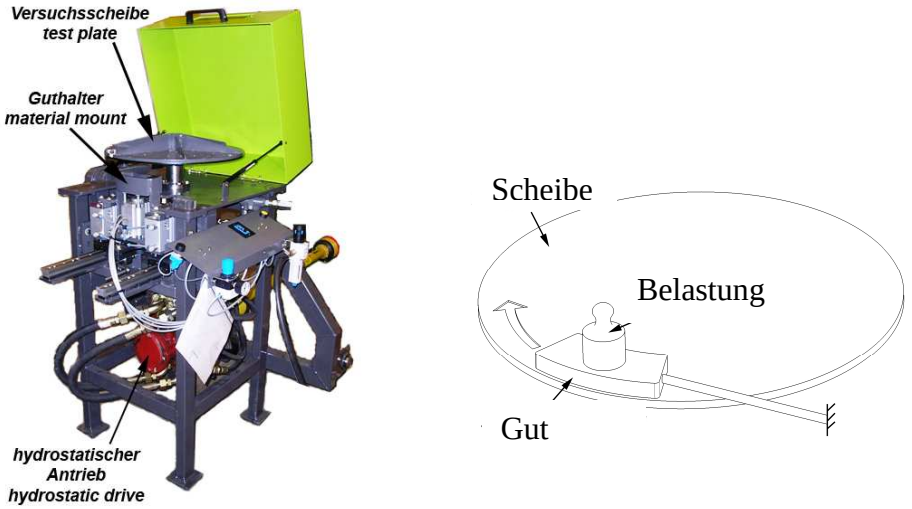



**Abbildung 1.: Skizze über das Messgerät für die Untersuchung des Reibbeiwerts von dem verkleinerten Produkt**

Scheiben mit verschiedenen Form und Material wurde an der Grundscheibe während der Untersuchungen befestigt. An den Scheiben befindet sich eine 50 mm breite bearbeitete Fläche, die als Grundfläche zur Reibung dient. Die Scheiben wurden mit 24 Stück Senkkopfschrauben an der Grundscheibe befestigt, damit das gleichmäßige Aufliegen ermöglichen. Die Untersuchungen wurden mit 6 verschiedenen Scheibentypen durchgeführt. Die Grundscheibe wurde aus S355 Stahl gefertigt. Die andere Scheiben wurden zu dieser einen geglichen, denen Stoff war Polyamid, Polyethylen und Polyurethan.

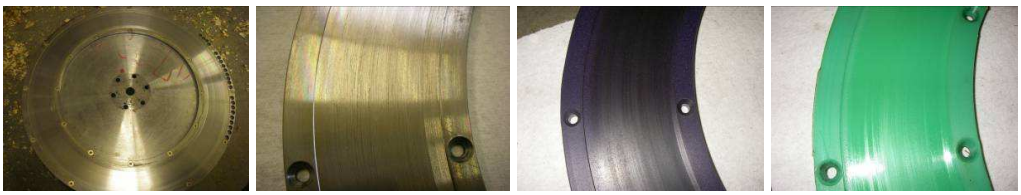


**Abbildung 2.: Scheiben aus verschiedenen Stoff zur Messung (v.l.n.r.: Stahl, Polyamid, 3 verschiedene Polyethylen, Polyurethan)**

Das Hacken wurde in dem s.g. Guthalter gelagert, der durch eine pneumatische Walze an der drehenden Scheibe gepresst wurde.

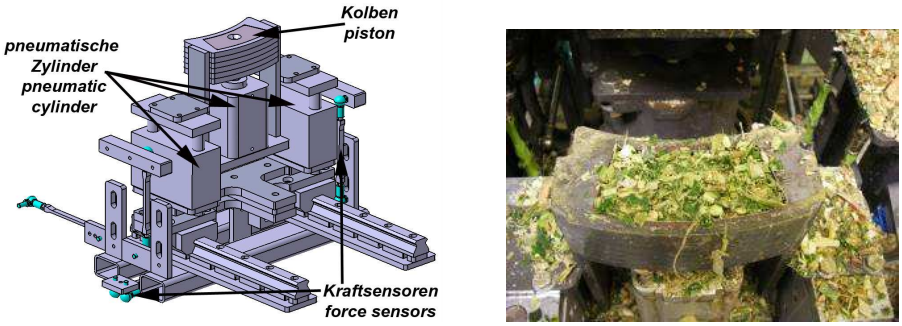



**Abbildung 3.: Guthalter**

Der Reibbeiwert oder Reibungswiderstand ist systemabhängig, der direkt nicht gemessen werden kann, der kann nur gerechnet werden. Dieser Widerstand kann durch die Reibungskraft und die Normalkraft bestimmt werden:

$$\mu = \frac{F_{súrlódási}}{F_{normál}} \quad . \tag{1}$$

Zur Berechnung des Reibungswiderstandes sind die Reibungs- und Normalkräfte zu messen. Der Guthalter hängt an Kraftmessstangen. Drei Kraftmessern sind für die Normalkraftbestimmung in Normalrichtung nach der Scheibenfläche, und eine bestätigt die Normalkraft in tangentialer Richtung. Am Ende der Stäbe befindet sich Gelenklager, deswegen nur reine Ziehen und kein Moment entsteht in denen.

Die Hauptparameter des Messgerätes:

- Scheibendurchmesser: 500 mm,
- Flächenbreite: 50 mm,
- Bewegungsgeschwindigkeit: 5-40 m/s,
- Belastung: 0,05-1 bar,
- Messzeit: 0,2-3 s.

### 2.1.1 Untersuchungsparameter, Ermittlung des Reibbeiwerts

Laboruntersuchungen wurden am Frühling 2007-2008 in Deutschland beim CLAAS KgaA. GmbH durchgeführt. Als Material wurden gehäckseltes Feldgras und Mais genutzt. Das Feldgras wurde in einer größeren Menge gehäckselt, das ich später während mehrere Tage verwendet habe. In dieser Weise war es möglich, der Einfluss der Feuchtigkeitsänderung an dem Reibbeiwert untersuchen zu können. Wenn das Feldgras aus verschiedenen Feldern gestammt hätte, würde die Quelle der Abweichung dieses Einflusswerts nicht eindeutlich bestimmt können. Die Abwachung kann aus der Feuchtdifferenz entstehen, oder sogar aus der Pflanzenstruktur. In meiner Untersuchung war nur die Feuchtigkeit different an den nachfolgenden Tagen. Das Feldgras wurde gerade vor der Messung ein paar Minute lang in einem Betonmischer gemischt, um das Produkt zu homogenisieren.

Mit Silomais ist es leider nicht möglich, aus demselben Muster mehrere Tage lang messen zu können, weil das gehäckelte Produkt in Kürze vergärt, und an zweitem Tag ist es schon unanwendbar für die Untersuchung. Die Untersuchungen mit Silomais wurden immer mit frisch gehäckseltem Silomais durchgeführt, deswegen dauerte lange die Untersuchung von dem Einfluss der Feuchte, weil dafür der Mais in verschiedenen Reifenstand gehäckselt sein musste. Vor der Untersuchung wurde das Maishacken auch mit Betonmischer gemischt, um das homogenisieren zu können. Die Feuchtigkeitsbestimmung wurde durch die herkömmliche Weise mit Offen durchgeführt. Das Gewicht des Hackenmusters wurde sowohl vor dem Trocknen als auch nach 45 Stunden Trocknen auf 105°C bestätigt. Der Unterschied dazwischen ergibt das Gewicht des gedampften Wasser oder Feuchte (w):

$$w = \frac{m_{feuchte} - m_{trocken}}{m_{feuchte}} \cdot 100 \quad [\%]. \qquad (2)$$

Die Reibbeiwertuntersuchungen wurden neben mehreren variable Parameter durchgeführt werden. Während der Messung wurden die folgenden Parameter bestätigt: Feuchte, Oberflächenbelastung, Gleitgeschwindigkeit, Hackenlänge, Oberflächenrauheit und der Einfluss von Gleitflächen aus anderen Stoff. Die Oberflächenbelastung wurde in vier Schritt geändert (0,05-0,03-0,01-0,005 MPa). Die Gleitgeschwindigkeit wurde ebenso in vier Schritt geändert (40-30-20-5 m/s). Laut dessen wurden 16 Untersuchungen neben den gleichen Feuchtigkeit und Hackenlänge durchgeführt.

| Belastung [MPa] | 0.05 | | | | 0.03 | | | | 0.01 | | | | 0.005 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gleit-Geschwindigkeit [m/s] | 40 | 30 | 20 | 5 | 40 | 30 | 20 | 5 | 40 | 30 | 20 | 5 | 40 | 30 | 20 | 5 |

Die Belastung wurde durch das Druckregelventil geregelt, und die Geschwindigkeit durch das Drosselventil. Die Häcksellänge war 4-9-14-17 mm für Feldgras, und 4-9-17 mm für Silomais.

Die Untersuchungen wurden wie folgt durchgeführt. Eine Messscheibe mit gegebenen Stoff und Rauheit wurde an dem Messgerät installiert, dann wurde das Hacken in Stoffbehälter gegossen. Danach wurden die Oberflächenbelastung und die Gleitgeschwindigkeit eingestellt, und dann wurde das Messen gestartet, wobei das Hacken durch die pneumatischen Walzen an der Scheibe gedruckt wurde. Die Reaktionskräfte wurden durch Messstangen bestätigt, denen Signalen durch einen SPIDER-8 Datensammler und das DIADEM Messsoftware aufgearbeitet wurden. Die Untersuchungen wurden neben verschiedenen Scheibenstoff und die oben genannten Parameterwechsel verwirklicht.

Die Messwerte wurden nach den Untersuchungen ausgewertet, wobei die Werte erstmal ausplaniert wurden, danach wurde der Quotient (oder die Reibbeiwert) der Reibungskraft und der Normalkraft gerechnet.

## 2.2. Feldversuche

Nach den Untersuchungen mit dem oben beschriebenen Messgerät habe ich so entschieden, dass auch Feldversuche durchgeführt werden soll. Während der Laboruntersuchungen der Reibbeiwert im Fall von gehäckseltem Gras neben Kunststoffgleitflächen mit 10% geringer war, als der neben Stahlgleitflächen (detailliert in Kapitel Ergebnisse). Damit kann der Energiebedarf der Maschine reduziert werden. Zu diesem Zweck wurde die Stahloberfläche von einem Häcksler auf Kunststoff gewechselt, die durch Schrauben und Schienen befestigt wurden. Die Kunststoffteile wurden durch Walzen gebogen. Kunststoffplatten an der Reduktion wurden auf 180°C aufgeheizt, dann wurde die endgültige Geometrie mit negativen Formen ausgebildet.

Zu den Feldversuchen wurden zwei Feldhäcksler verwendet. Die Untersuchungen für Gras wurden neben 3 verschiedenen Hackenlänge und 4 verschiedenen Durchlass durchgeführt.

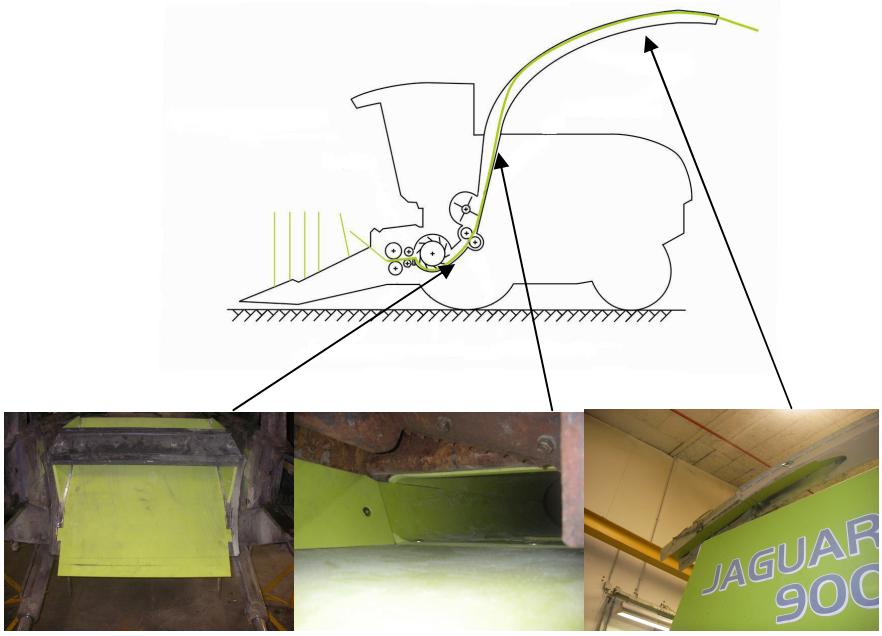



**Abbildung 4.: Kunststoffgleitflächen**

Während der Messung wurden der Durchlass der Maschine und die Leistungsannahme der Einzelteile bestätigt, daneben noch die Feuchtigkeit des Hackens und die Hackengeschwindigkeit am Ende des Ausblasturmes. Der Durchlass wurde so ermittelt, dass nachdem der Feldhäcksler mit gleichmäßiger Geschwindigkeit an der Messstrecke gefahren ist, wurde das Produktgewicht in dem Förderwagen bestätigt, und dadurch konnte schon der Durchlass bestimmt werden. Moment- und Drehzahlmesseinrichtungen wurden zu der Messung des Leistungsbedarfes verwendet. Momentbedarf der Zufuhreinheit, der Häckslertrommel, der Kernreiberwalzen und der Beschleunigungstrommel wurden getrennt bestätigt. Danach konnte der spezifische Energiebedarf berechnet werden. Der Gesamtleistungsbedarf ist demnächst:

$$P_{Gesammt} = P_{Htrommel} + P_{Einzugsw.} + P_{Quetschw.} + P_{Nachbesch.}. \qquad (3)$$

Der spezifische Energiebedarf:

$$E_{spezifische} = \frac{P_{Gesammt}}{Q}\left(\frac{kWh}{t}\right), \qquad (4)$$

wobei: $P_{Gesammt}$ - Gesamtleistungsbedarf des Hackens (kW),
$Q$ - der gemessene Durchlass (t/h).

Das Ergebnis von dem modifizierten Häcksler wurde einem Serienhäcksler gegenübergesetzt

# 3. Ergebnisse und Auswertung

### Der Reibbeiwert nach der Belastung

Zur Aufbewahrung des Grases wird es mit zirka 50-60% Feuchtigkeit gehäckselt. Neben größerer Feuchtigkeit wird das Wasser während des Pressens ausgedruckt, und würde damit auch wertvolle Nahrungsmittel verloren. Der Reibbeiwert von gehäckseltem Gras wurde in der These 2 dargestellt (neben p=0,005 MPa, v=30 m/s, l=17 mm, w=65 %), der etwas über 0,7 liegt. Diese große Reibung bremst schon bedeutend das Hacken. In dieser Abbildung ist es auch zu sehen, dass neben Belastungszunahme und 0,05 MPa Belastung der Reibbeiwert auf 0,5 abnimmt, der zirka 25% Abnahme bedeutet. Wenn der Belastung sich verändert (andere Parameter bleiben unverändert), der Reibbeiwert verändert sich auch in großem Maß. Das kann durch mehrere Sachen verursacht werden, wie z.B. das Verändern der Haftungs- und Deformationskomponente, oder das Wasser in der Pflanze.
Messergebnisse von Feldgras mit 12,5% Feuchtigkeit sind in Abb. 5 dargestellt. Der Reibbeiwert verändert sich in diesem Fall nach der Belastung nur kaum.

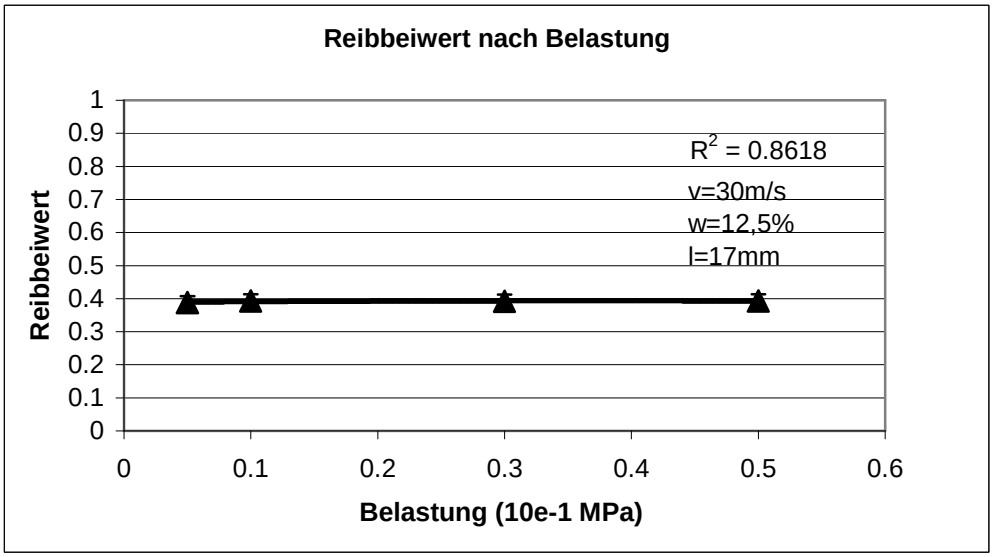



**Abbildung 5.: Der Reibbeiwert nach der Oberflächenbelastung beim Gras (w=12,5%)**

Die zwei Messungen unterstützen die Voraussetzung, dass die Feuchte bei dem Material mit größerer Feuchtigkeit an der Kontaktfläche gepresst wird, die den Reibungswiderstand reduziert hat. Daneben ist es auch wahr, dass je feuchter desto weicher das Material ist, und das trockene Material ist mehr starr und hart. Die Reibungskraft wird neben große Oberflächenbelastung (z.B.

Trommelplatte) trotzdem der großen Normalkraft wegen der Minderung des Reibbeiwerts reduziert. So wird auch der Reibungsverlust kleiner.

**Der Reibbeiwert nach der Gleitgeschwindigkeit**

Der Reibbeiwert wird auch durch die Gleitgeschwindigkeit beeinflusst. Neben niedriger Gleitgeschwindigkeit habe ich niedriger Reibbeiwert gemessen, der neben 0,03 MPa Oberflächenbelastung 0,4 war, und wenn die Gleitgeschwindigkeit sich erhebt, dann nimmt der Reibbeiwert auch zu. In diesem Fall ergibt sich auch Änderung in dem Systemstruktur. Neben höherer Gleitgeschwindigkeit ersteht höhere Wärme wegen der größeren Reibung. Die Feuchtigkeit verschwindet sich wegen der Wärme aus den Kontaktflächen, das resultiert schlechtere Reibungsverständnisse, und ergibt sich ein größerer Reibungswiderstand. Nach den Ergebnissen ist es zu bestätigen, dass aus der Hinsicht des Reibungsverlustes die Hackenförderung mit Hochgeschwindigkeit ungünstig ist. Wenn die andere Parameter von den Material konstant bleiben (Oberflächenbelastung, Hackenlänge, Oberflächenrauheit), dann der Reibungsverlust neben kleinerem Geschwindigkeitswert günstiger wird.

**Der Reibbeiwert nach der Feuchtigkeit**

In diesem Kapitel wird der Einfluss von der Feuchtigkeit detailliert. Die Messungsergebnisse sind in Abb. 6 zu sehen. Der Reibbeiwert war 0,5 neben 68% Feuchtigkeit, und neben Feuchtigkeitszunahme fängt der an zu senken. Dessen Maximalwert ist gegen w = 40-50%, und danach senkt er. Das Wasser dient als Schmierstoff neben hoher Feuchtigkeit, damit die Reibung reduziert werden kann. Das Gras mit 10-20% Feuchtigkeit ist schon trocknen und hart. Der Schmiereffekt vom Wasser ist schon gegen 40% Feuchtigkeit kaum merkbar, aber das beeinflusst bedeutend die Adhäsion, deswegen kann sich das Produkt an der Seitenwand aufkleben. Diese Ergebnisse wurden auch in der Praxis bewiesen, weil das Hacken mit 60% Feuchtigkeit gleichmäßiger in dem Häcksler fließt. Das gleiche ist gültig für trockenes Gras, das mit 45% Feuchtigkeit an der Wand aufklebt. Diese Erscheinung ist auch mit dem Zuckerinhalt des Grases in Zusammenhang, die in der Praxis sehr bekannt ist, in erster Linie in den Niederlanden. Nachdem das Gras an den Gleitflächen aufgeklebt hat, verhindert die Produktströmung und kann auch das Kanal kurzfristig verstopfen.

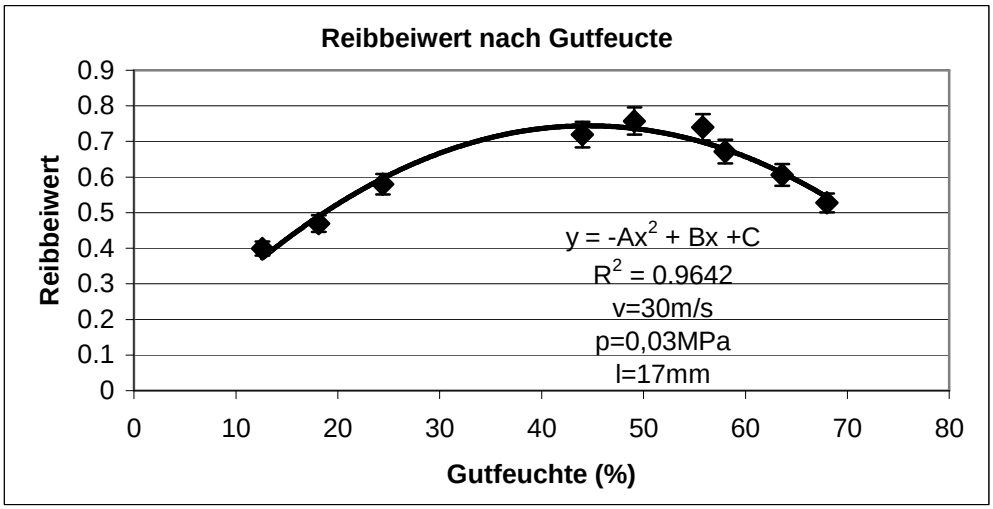



**Abbildung 6.: Der Reibbeiwert nach der Feuchtigkeit beim Gras**

## Der Reibbeiwert nach der Hackenlänge

Die Änderung des Reibbeiwerts wird nach der Hackenlänge demnächst detailliert. Während dieser Messungen wurden die Belastung, die Gleitgeschwindigkeit und die Feuchtigkeit konstant gehalten, deswegen hat sich nur die Hackenlänge geändert. Die theoretische Hackenlänge war 4 mm, 9 mm, 14 mm und 17 mm. Die verschiedene Länge hat keine Änderung in der Struktur verursacht, deswegen kann die Hackenlänge den Reibbeiwert in dem Betriebsbereich nicht beeinflussen.

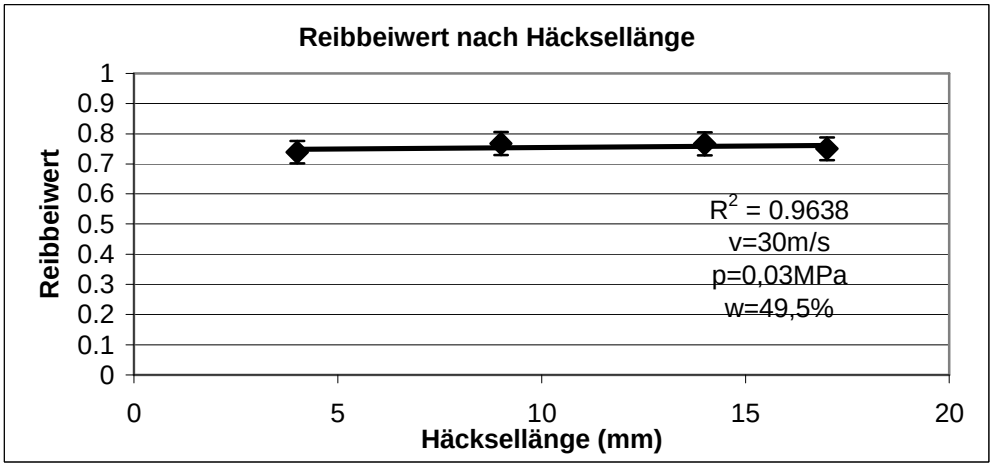



**Abbildung 7.: Der Reibbeiwert nach der Hackenlänge beim Gras**

**Der Reibbeiwert neben Gleitflächen aus verschiedenen Stoffen**

Früher habe ich schon erwähnt, dass während den Messungen neben dem Stahl auch der Kunststoff getestet wurde. Die untergesuchten Stoffe waren der METALEN P und der METALEN 1000, die beide zur Gruppe UHMW-PE gehören. Der METAMID 703XXL Kunststoff ist ein wachshaltiges Polyamid. Daneben wurde noch manche Untersuchungen durch Polyurethan Scheiben durchgeführt.

Ergebnisse von einer willkürlich ausgewählten Messung werden hier detailliert, aber diese Abweichung zwischen den Kunststoff und den Stahl taucht auch bei alle anderen Messungsergebnissen auf. Es ist zu sehen, dass der Reibbeiwert der Polyurethan Scheibe nur in geringen Druckbereich kleiner als der von dem Stahl war. Daneben der Reibbeiwert einer Polyethylen oder Polyamid Scheibe hat mit 40% den von dem Stahl in demselben Messungspunkt übergeschritten. Es gibt kein bedeutend Unterschied zwischen eine Polyamid und eine Polyethylen Scheibe, besonders wenn der Messungsfehler von 5% auch berücksichtigt wird. Messungen haben die Annahme bewiesen, damit Polyamid und Polyethylen bessere Gleiteigenschaften auch beim Grashacken haben. Ein anderer Vorteil von Polyethylen gegen Stahl ist dessen geringer Klebefähigkeit, deswegen das Hacken wird auch schwieriger an der Wand aufgeklebt sein. Diese Eigenschaft ist aus unserer Hinsicht sehr vorteilhaft neben die guten Gleiteigenschaften. Ein Nachteil davon ist der schlechtere Verschleiß, aber er wird noch später detailliert.

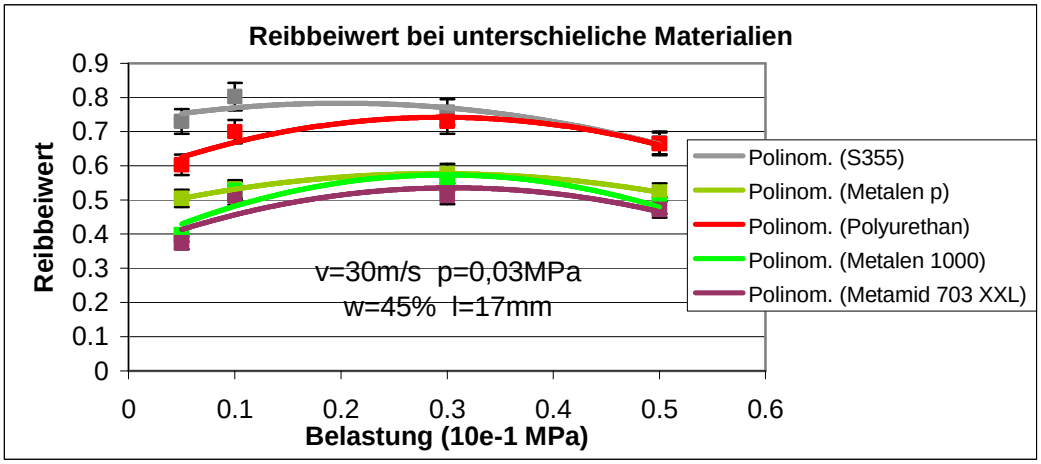



**Abbildung 8.: Der Reibbeiwert bei Gleitflächen aus verschiedenen Stoffen**

## 3.1. Messungsergebnisse beim Silomaishacken

### Der Reibbeiwert nach der Belastung

Der Silomais wird zum Silobau in Wachsreife mit 65-70% Feuchtigkeit geerntet werden. Mit der Ernte lohnt sich nicht mit höheren Feuchtigkeit anzufangen, weil wertvolle Nährungsmittel verloren werden können. Der Reibbeiwert des Maishackens beträgt auf 0,2-0,3 (These 2), der kann laut der Ernteparameter in kleinem Maß unterschiedlich sein. Das kann aber eindeutig bestätigt werden, dass der Reibbeiwert des Silomaises nur ein Drittel des Feldgrases ist. Deswegen wird das Maishacken in der Maschine weniger gebremst werden, und strömt gleichmäßiger als das Grashacken. Das wurde auch praktisch untergestützt. Der Reibbeiwert wurde nach der Oberflächenbelastung in der These 2 dargestellt, und da ist es zu sehen, dass je größer die Oberflächenbelastung ist, desto weniger der Reibbeiwert ist. Dieser Wert war 0,3 neben 0,005 MPa Belastung, und er war nur 0,2 neben 0,05 MPa Belastung, was 30% Senkung bedeutet. Die Ursache dafür ist einerseits die Anteiländerung von den Adhäsiven- und Deformationskomponenten, und anderseits das aus dem Pflanze gepressten Wasser. Das heißt, dass sich das während der Interaktion zwischen das Hacken und Stahl entstehendes tribologischen System verändert.

### Der Reibbeiwert nach der Gleitgeschwindigkeit

Wenn sich die Gleitgeschwindigkeit verändert, verändert sich auch das tribologische System. Neben niedriger Gleitgeschwindigkeit wird der Reibbeiwert niedriger, ebenso wie er sich beim Gras bemüht, und wenn die Gleitgeschwindigkeit sich erhebt, nimmt der Reibbeiwert auch zu. Neben höherer Gleitgeschwindigkeit verändern sich die Wärmebedingungen wegen der größeren Reibung, weil während Einheitszeit neben höherer Gleitgeschwindigkeit mehr Wärme zwischen die Kontaktflächen entsteht. Die Wärme lässt die Feuchte verdampfen, und werden die Reibungsverhältnisse bedeutend gemindert.
Laut des Diagrams ist es zu bestätigen, dass das Hacken auf das optimale Geschwindigkeit beschleudert werden soll, umsonst bei höherer Geschwindigkeit (~40 m/s) resultiert höhere Reibung und hat höhere Energiebedarf.

### Der Reibbeiwert nach der Feuchtigkeit

Der gehäckselte Mais ist ein biologischer Stoff, deswegen dessen tribologische Eigenschaften werden durch dessen Feuchtigkeit bedeutend

beeinflusst. Der Mais kann nicht mit großer Feuchtigkeit konserviert werden, weil der in Kürze wegen der Bakterien gären wird, und so ist er für Messungszwecken total ungeeignet. Der Pflanze wird auf den Beinen getrocknet werden, um die Untersuchungen durchführen zu können, deswegen wurde er 2-3 Täglich gehäckselt. Die Feuchtigkeit des Hackens war zwischen 54%-73%, obwohl die 54% schon so einen trockenen Mais bedeutet, dass er für das Silo wegen Komprimierungsproblemen nicht mehr geeignet ist. Neben geminderter Feuchtigkeit ergibt sich erhöhte Reibbeiwert, ebenso wie beim Gras. Das Wasser wirkt als Schierstoff in höheren Feuchtigkeitsbereich. Wenn sich die Feuchtigkeit zunimmt, dann nimmt auch die Adhäsion zu, und die resultieren schlechter Gleiteigenschaften.

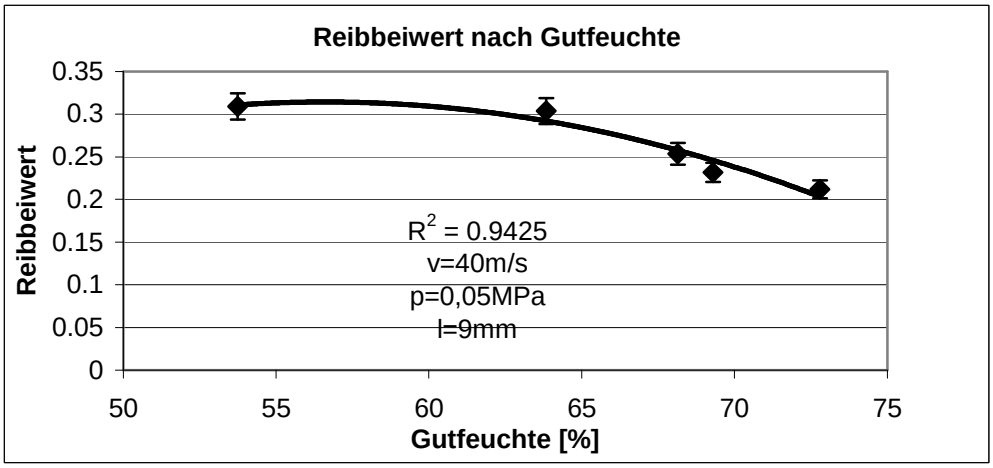



**Abbildung 9.: Der Reibbeiwert nach der Feuchtigkeit beim Silomais**

## Der Reibbeiwert nach der Hackenlänge

Während der Messungen wurde die Veränderung des Reibbeiwerts auch nach der Hackenlänge untergesucht, wobei die Belastung, die Gleitgeschwindigkeit und die Feuchtigkeit konstant gehalten wurden, deswegen hat sich nur die Hackenlänge geändert. Die theoretische Hackenlänge war 4 mm, 9 mm und 17 mm. Die Veränderung in Makrostruktur hatte noch den Adhäsionsfaktor, nicht einmal den Deformationsfaktor in diesem Reibungssystem bedeutend beeinflusst, deswegen hat sich der Reibbeiwert auch nicht verändert.

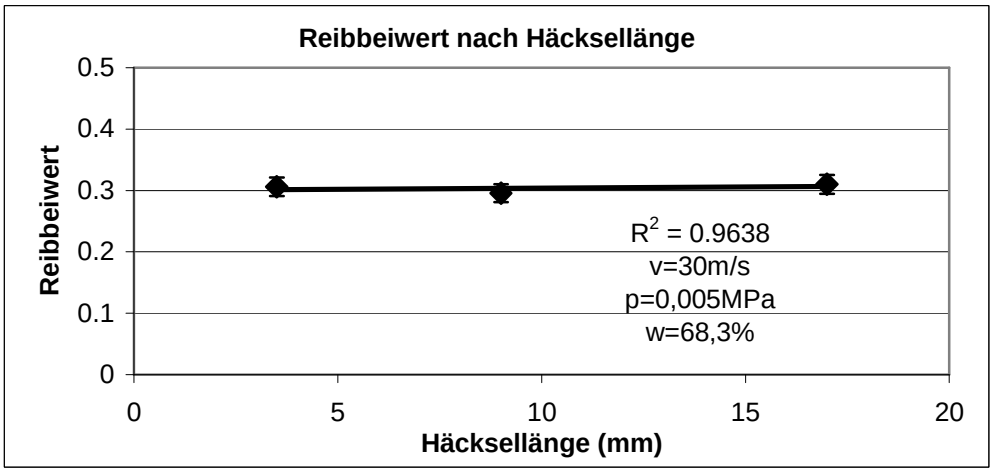



**Abbildung 10.: Der Reibbeiwert nach der Hackenlänge beim Silomais**

## Der Wert des Reibbeiwerts bei verschiedenen Stoffen

Untersuchungen mit Mais wurden auch mit Kunststoffscheiben durchgeführt. Aus den bisherigen Messungen kann es eindeutig bestätigt werden, dass der Mais bessere Gleiteigenschaften hat, als das Gras. Abb. 11 zeigt eindeutig, dass neben Maishaken kein Unterschied zwischen den Polyethylen und den Stahlscheibe erweist werden konnte. Nach der Berücksichtigung des Messfehlers ist es zu bestätigen, dass der Wert und der Tendenz des Reibbeiwerts identisch sind. Der Polyurethan Scheibe mit seiner 40% Abweichung von dem Stahl bedeutet eine Ausnahme unter die Kunststoffscheiben.

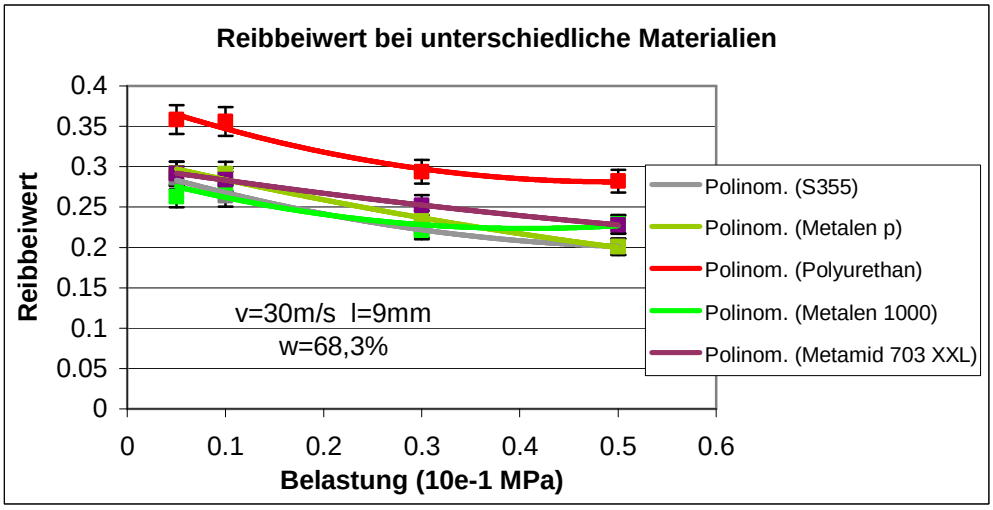



**Abbildung 11.: Der Reibbeiwert an Gleitflächen aus verschiedenen Stoff**

Gemäß die Messungen mit Mais ist es zu bestätigen, dass obwohl der Reibbeiwert durch die Anwendung von Polyurethan Scheibe nicht gesenkt wird, ist er auch nicht höher als der beim Stahlgleitflächen.

## 3.2. Ergebnisse der Feldversuchen

Die Abb. 12 zeigt die Messergebnisse für Grashacken, wobei die schwarzen Punkte die Messergebnisse von Kunststoffgleitflächen markieren, und die weißen Punkte präsentieren die Ergebnisse von der Serienausrüstung. Feldversuchsergebnisse haben die Laboruntersuchung untergestützt, und zwar die Kunststoffgleitflächen hatten geringe Reibungswiderstände, deswegen der Energiebedarf des Häckselns ist auch weniger. Der Gesamtenergiebedarf von einem mit Kunststoffgleitflächen ausgerüsteten Feldhäcksler war wegen den günstigen Gleiteigenschaften von PE 10% weniger als der von einer Serienmaschine.

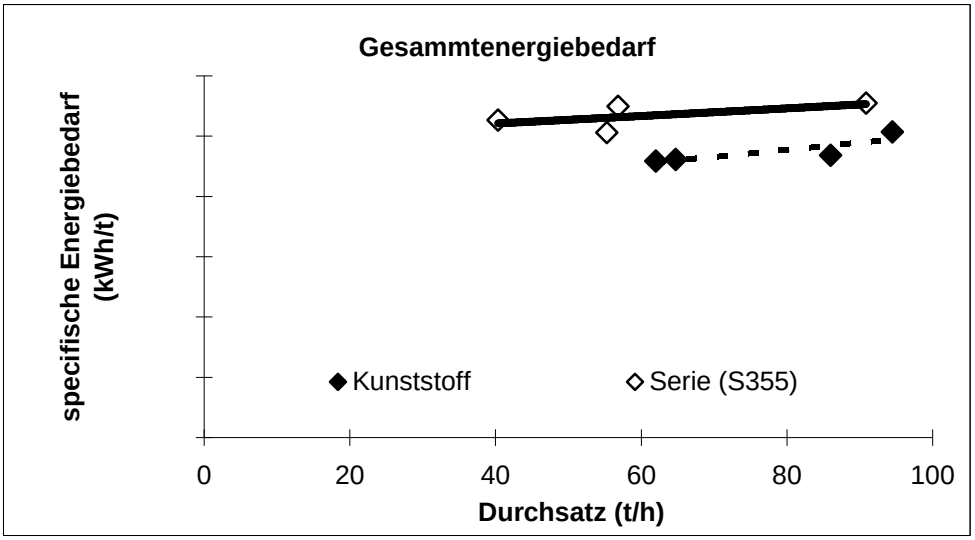



**Abbildung 12.: Feldversuchsergebnisse beim Grashäckseln (l=17 mm, w=45,3%)**

Im Herbst von 2008 habe ich Untersuchungen mit Maishacken gemacht, die ähnlich an den von Gras durchgeführt wurde. Feldhäcksler mit Kunststoffeinlage und Serieneinlage haben auf demselben Feld gearbeitet (die Messergebnisse sind in Ab. 13 zu sehen). Die Messergebnisse mit Mais waren ähnlich an die in den Laboruntersuchungen, damit der Kunststoff mit1-2% bessere Ergebnisse hatte. Nach der Berücksichtigung des Messfehlers ist es zu bestätigen, dass der Reibungsverlust zwischen Stahl und Kunststoffgleitflächen neben Maishäckseln übereinkommen.

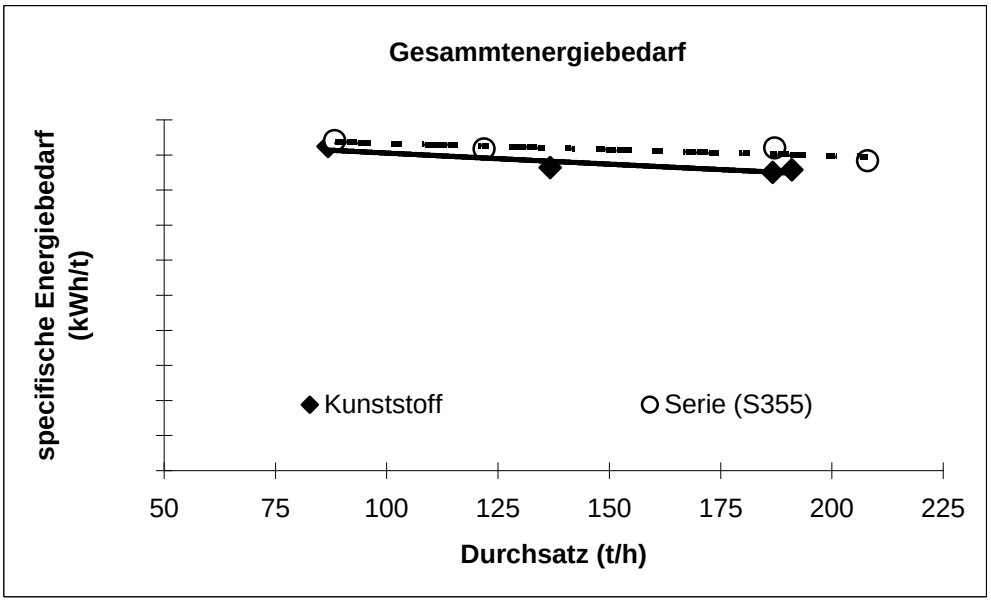



**Abbildung 13.: Feldversuchsergebnisse beim Maishäckseln (l=9 mm, w=64,6%)**

Ein anderer Vorteil der Kunststoffgleitflächen beim Grashäckseln ist das geringe Ankleben des Grases an den Wänden.

## 3.3. Berechnungsergebnisse von CFD-DEM

Luftgeschwindigkeit- und Druckverteilung in der Maschine und der Bewegungsstrecke des Hackens wurden durch die CFD-DEM gekoppelter Berechnung kalkuliert. Gemäß der CFD Berechnung der Gewichtsstrom der Luft war 2,63 kg/s, wobei 1,00 kg/s aus der Häckslertrommel kommt, und 1,63 kg/s wird durch die Beschleunigungstrommel seitlich eingesaugt. Die Geschwindigkeitsverteilung der Luft und des Gutes wurde in Abb. 14 dargestellt. Das Hacken tritt mit ~20 m/s aus dem Ausblasturm aus, und dieser Wert ist mit dem Messwert von 20,8 m/s in Übereinstimmung.

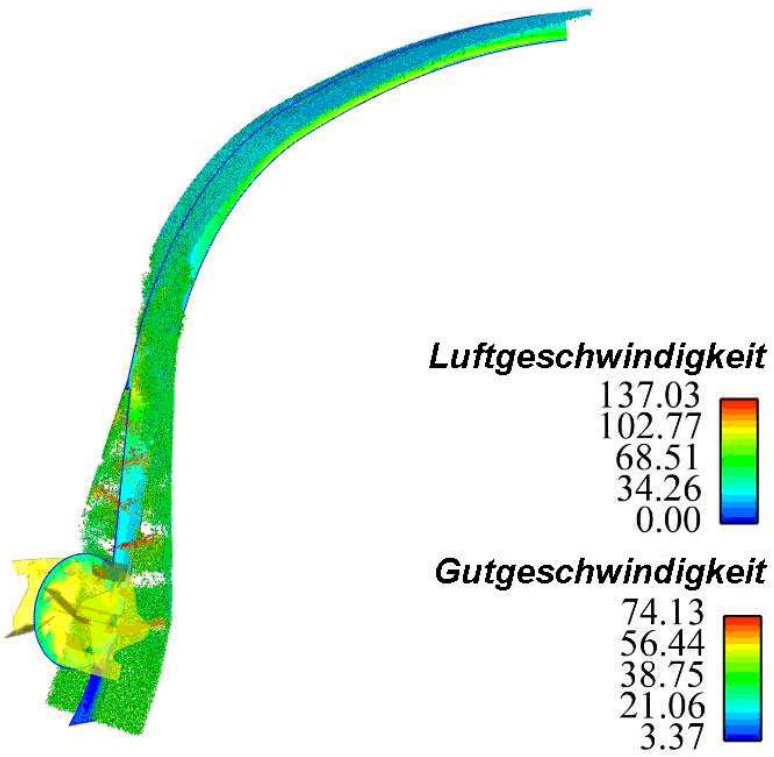



**Abbildung 14.: Berechnungsergebnis von CFD-DEM**

Der Teil nach der Bescheunigungstrommel wurde in Abb. 15 vergrößert. Laut der Berechnung tritt die Geschwindigkeit des Hackens nur in einigen Stellen die 68 m/s über, weil der größte Anteil die Trommel mit 50 m/s verlässt. Die Abbildung zeigt, dass das Hacken nur wenig in dem Reduzierstück gebremst wird. Der Grund dafür ist das, dass die Ablassöffnung des Reduzierstückes kleiner ist, als die Zufuhröffnung, deswegen sich die Geschwindigkeit gemäß der Kontinuität erhöhen muss. Das gilt für das Fluidum mit geringer Trägheit, d.h. für die Luft, und es ist auch in der Abbildung zu sehen, dass die Luftgeschwindigkeit beim Ablauf über 100 m/s gerät. Demnächst die Luft nimmt parallel das Hacken mit, damit das mit ~40 m/s Geschwindigkeit in den Ausblasturm eintritt. Das Hacken verliert seine kinetische Energie sowohl wegen der Reibung als auch wegen des Stoßens. Die Schaufeln an der Beschleunigungstrommel sind geschoben installiert, deswegen taucht der Gewichtsstrom auch geschoben auf. Der Stoßverlust ist in dem ersten Teil wegen dieser Verschiebung, weil die Partikeln den leeren Raum leichter auffüllen können. Während des Vormarsches in dem Auswurfschacht wird der Stoßverlust wegen der Reduzierung gesteigert.

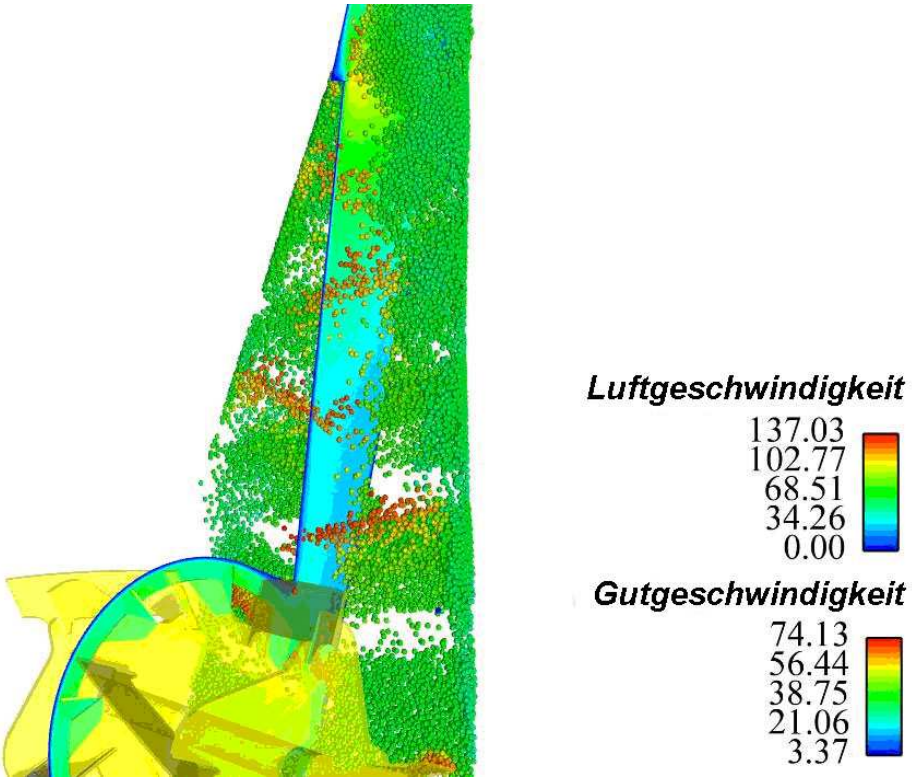



**Abbildung 15.: Geschwindigkeitsverhältnisse in dem Auswurfschacht (m/s)**

## 3.4. Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse erlauchten solche Möglichkeiten, damit der Reibungsverlust in Feldhäcksler reduziert werden kann, und der Maschinenleistungsgrad der nimmt ständig zu.

Gemäß der Laboruntersuchungen ist der Reibbeiwert des Grases neben Erntefeuchtigkeit (~50%) gegen 0,8 (er ist natürlich abhängig von der Gleitgeschwindigkeit und der Belastung), der schon bedeutend ist. Dagegen der Reibbeiwert des Silomaises war nur gegen 0,25. Demnächst ist es zu sehen, dass es zwischen die zwei Pflanzen großer Unterschied gibt. Das entdeckt sich auch in der Praxis, weil das Maishacken aus der Maschine viel mehr gleichmäßig und schneller rauskommt, als das Gras.

Die Zunahme der Gleitgeschwindigkeit beeinflusst den Reibbeiwert unvorteilhaft. Der Reibbeiwert erhöht sich neben zunehmende Gleitgeschwindigkeit in beiden Fällen, das durch die während der Reibung entstehende Wärme geklärt werden kann. Die Feuchtigkeit verändert sich in dem Kontaktbereich, deswegen nimmt die Adhäsion zu. Laut der Ergebnisse ist es Wert, die Fördergeschwindigkeit niedrig zu halten, damit der Reibungsverlust gemindert werden kann. Demnächst muss das Hacken weniger beschleunigt werden, damit auch der Bescheunigungsverlust reduziert werden

kann. Deswegen soll der Konstrukteur in erster Linie nicht danach streben, um das Hacken so schnell wie Möglich beschleudern lassen, weil es einen unnützlichen und untauglichen Energiebedarf resultiert.

Neben der Steigung der Oberflächenbelastung nimmt der Reibbeiwert ab. Das kommt in erster Linie bei hoher Feuchtigkeit (über 50%) vor. Die Veränderung wird durch die Veränderung von den Haftungs- und Deformationskomponenten der Reibung verursacht. Der Haftungskomponente nimmt ab, weil Wasser aus dem feuchten Produkt in dem Kontaktbereich ausgepresst wird. Neben geringerer Feuchtigkeit (unter 20%) kann diese Veränderung nicht beobachtet werden. Der Wert des Reibbeiwerts verändert sich nicht nach der Belastung in diesem Fall, weil kein Wasser mehr aus dem Produkt ausgepresst werden kann, und deswegen verändert sich nicht einmal die Haftungskomponente. Obwohl der Reibbeiwert neben der Belastungssteigung abnimmt (beim feuchten Produkt), der Reibbeiwert ist neben größerer Oberflächenbelastung größer, als neben kleinerer Belastung. Deswegen soll die Oberflächenbelastung (d.h. die Normalkraft) möglichst klein sein.

Demnächst wurde der Reibbeiwert des Grases neben w = 65% Feuchtigkeit nach der Oberflächenbelastung und die Gleitgeschwindigkeit in Abb. 16 dargestellt werden. Es ist zu sehen, dass an den Messpunkten eine Fläche angelegt werden kann. Der kleinste Reibbeiwert ergibt sich neben 0,05 MPa Belastung und 5 m/s Geschwindigkeit, und der größte neben 0,005 MPa Belastung und 40 m/s Geschwindigkeit.

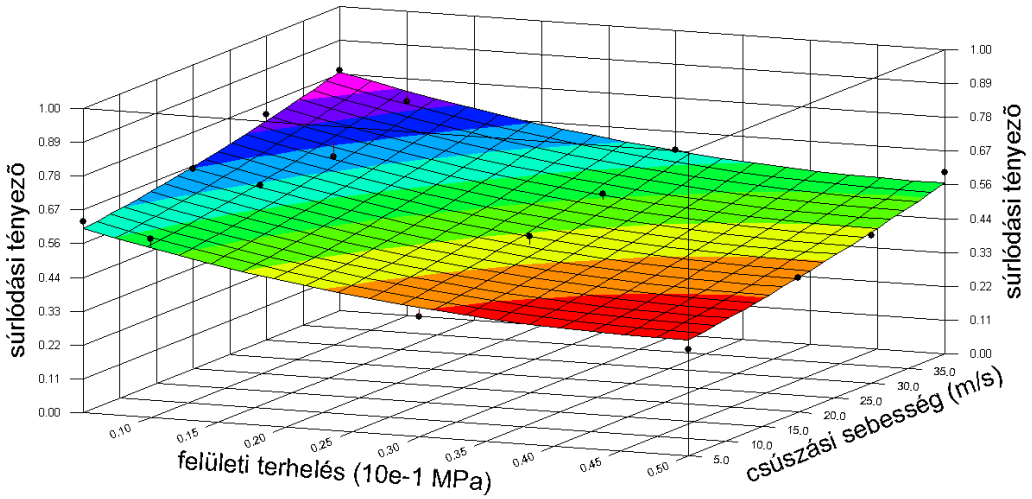



**Abbildung 16.: Der Reibbeiwert nach der Gleitgeschwindigkeit und der Oberflächenbelastung**

Die Feuchtigkeit beeinflusst den Reibbeiwert bedeutend. Feuchtigkeitskurven vom Gras haben ihren Maximalwert gegen 45-50%. Das als Schmierstoff wirkende Wasser mindert den Reibbeiwert beim feuchtem

Gras (>60%). Die Adhäsion steigt mit der Abnahme der Feuchtigkeit, deswegen nimmt auch der Reibungswiderstand zu. Neben der weiteren Feuchtensenkung spielt das Wasser immer weniger Rolle in der Adhäsion, deswegen nimmt auch der Reibbeiwert ständig ab. Der Reibbeiwert hat auch beim Silomais neben Feuchtigkeitssenkung zugenommen. Laut den Messungen erreicht die Kurve ihren Maximalwert bei ~55% Feuchtigkeit, und danach fängt der Reibbeiwert auch bei Mais an, den Wert abzunehmen. Die Feuchtigkeit muss bei der Grasernte (besonders zum Konservierung) zwischen 50-55% liegen, die ungünstig aus der Hinsicht der Reibung ist, weil dieser Punkt ganz Nahe dem Maximum fällt. Zum Sauerfutterfertigung muss dieser Wert über 60% sein, wobei der Reibbeiwert geringer ist, deswegen wird der Reibungsverlust auch geringer. Der Silomais wird im Allgemeinen in Wachsreife mit 65-70% Feuchtigkeit geerntet. In diesem Fall ist der Reibbeiwert gering, der auch weniger Reibungsverlust bedeutet, als bei geringerer Feuchtigkeit.

Veränderung der Hackenlänge verursacht in dem Betriebsbereich (3-20 mm) keine Änderung in dem Reibbeiwert. Die Hackenlänge von Gras oder Mais wird grundsätzlich gemäß dem Verwendungszweck eingestellt. Die Hackenlängeänderung verursacht keine solche Veränderung, die den Einflusseffekt von der Deformation erhöht, weil es nur eine makroskopische Änderung ist.

Die Oberflächenrauheitsänderung lässt den Reibbeiwert verändern. Die Untersuchungen wurden durch Scheiben mit verschiedener Rauheit durchgeführt. Aus den Ergebnissen ist es eindeutig zu sehen, dass zunehmender Oberflächenrauheit steigernden Reibbeiwert resultiert. Es kommt davon aus, dass sich aus den Haftungs- und Deformationskomponente der Reibung nur die letzte verändert, weil neben größerer Oberflächenrauheit auch die Pflanzendeformation zunimmt.

Das Hacken verschleißt die Oberflächen ständig mit 400 t/h Gewichtsstrom. Noch dieses Fakt, nicht einmal die Messergebnisse begründen das Abrauhen der Oberflächen. Die grobe Flächen abreißen sich glatt, und lässt auch den Reibungswiderstand erhöhen.

Gemäß den Untersuchungen kann der Reibungswiderstand mit Kunststoffgleitflächen (in erster Linie beim Gras) bedeutend gemindert werden. Die ergaben 20% weniger Reibbeiwert beim UHMW Polyethylen als beim Stahl. Diese günstige tribologische Eigenschaft kommt aus die wenige Adhäsion. Aber diese günstige Gleiteigenschaft ist leider mit einer ungünstigen Verschleißeigenschaft gebunden. Gemäß den Feldversuchen hat das mit Glaskugeln versehene Polyethylen (METALEN 1) die besten Verschleißwiderstand, trotzdem der noch immer weit weg von dem Stahl ist. Gleiteigenschaften von dem Polyamid ist ebenso gut, wie die von Polyethylen, aber dessen Verschleißwiderstand ist bedeutend schlechter. Die Laboruntersuchungen haben unterstützt, dass der Reibungsverlust durch die Verwendung von UHMW Polyethylen gemindert werden kann. Demnächst

wurden die Gleitflächen von dem Feldhäcksler auf METALEN 1 Kunststoff ausgetauscht. Die Feldversuche haben die geringere Reibungsverlust von Kunststoffgleitflächen eindeutig beweist. Dadurch konnte auch der Leistungsbedarf des Hackens reduziert werden. Der spezifische Energieverbrauch des Grashackens mit Kunststoffgleitflächen konnte 10% gemindert werden, und es kann sowohl 10 Liter (!) Kraftstoffersparnis bedeuten. Er hat neben seinen günstigen Gleiteigenschaften auch den Vorteil, dass das Gras an seine Wände nur sehr schwer ankleben kann, damit die Verstopfungsgefahr der Maschine weniger ist. Letztendlich bietet das UHMW PE eine neue Möglichkeit, damit der Reibungsverlust während des Hackens reduziert werden kann. Seine derzeitig ungünstigen Verschleißeigenschaften können in der Zukunft durch Raumnetz oder Zusatzstoff verbessert werden.

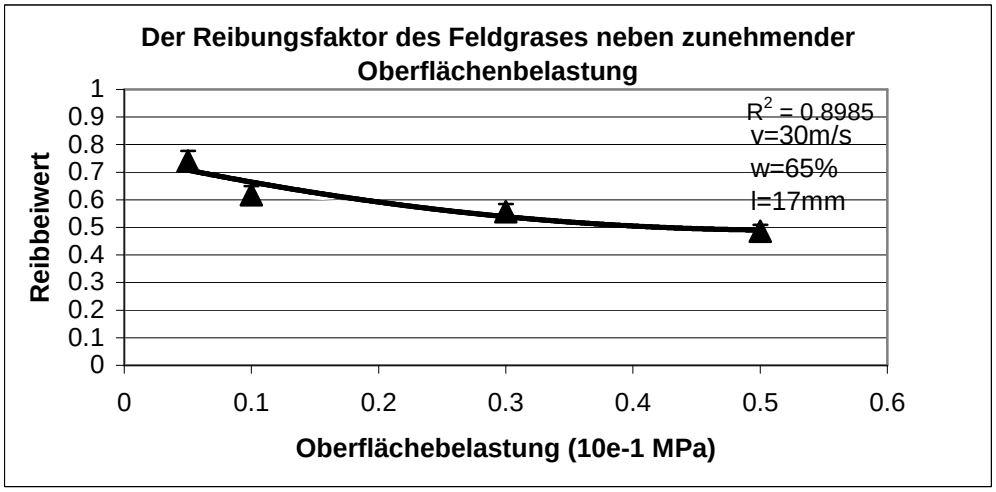
Die Hackenbewegungsweg kann durch das CFD-DEM gebundenen Simulation visuell gezeigt werden. Dadurch kann es auch geklärt werden, damit die strömende Luft – besonders nach der Bescheunigungstrommel bei dem Reduzierstück – gewissermaßen den durch die Reibung verursachte Geschwindigkeitsverlust kompensiert, nämlich die beschleunigte Luft nimmt das Hacken mit, damit seine kinetische Energieverlust ersetzt werden kann.

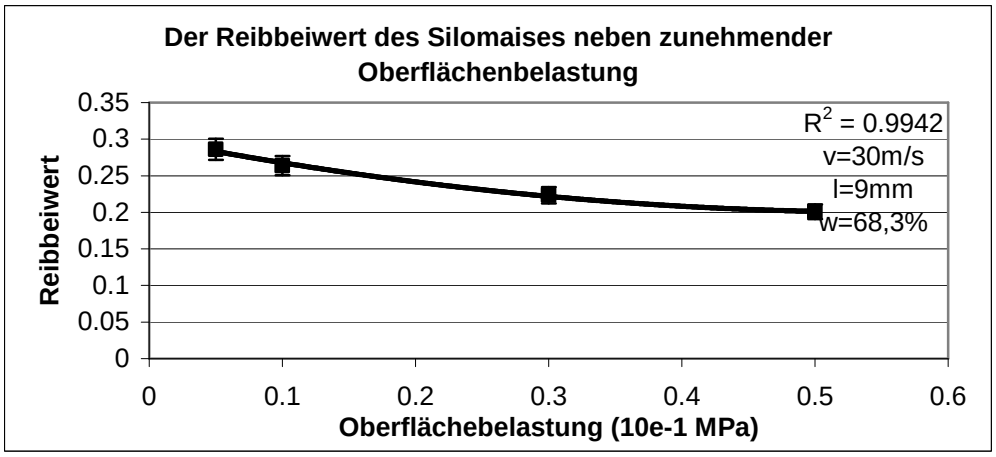
Nach der wiederholten Berechnungen und geometrischer Optimierung der Kurven kann der Reibungsverlust noch mehr gemindert werden. Der konnte einmal durch die geometrische Optimierung des Ausblasturmes reduziert werden, damit das Hacken mit höherer Geschwindigkeit die Maschine verlassen kann. Solche Optimierung kann bei jedem Einzelteil durchgeführt werden.

## 3.5. Neue wissenschaftliche Ergebnisse

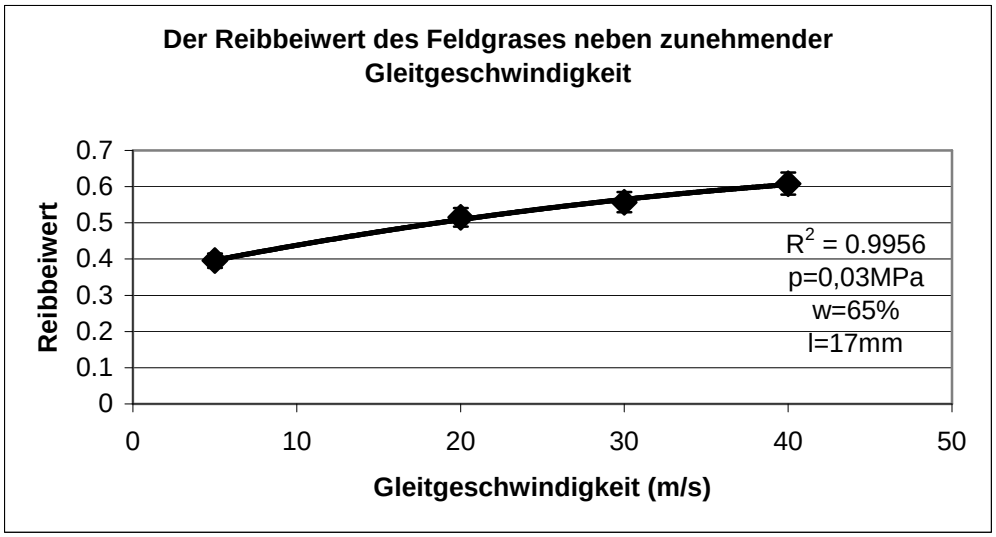
**1.** Ich habe bestätigt, dass der Energieanspruch von inneren Arbeitsprozessen von einem Feldhäcksler wird durch das Häckseln und in großem Teil durch die Reibungsverluste des Materialtransportes des Produktes an den Metalloberflächen beeinflusst. Deswegen wurden verschiedene Versuche zur Bestimmung des Reibungsfaktors durch die von mir geplanter Messungseinlage und durch Feldversuche (mit Scheiben von 500mm Durchmesser aus verschiedenen Materialen; mit gehackseltem Feldgras und mit Silomais; Gleitgeschwindigkeit: 5-40m/s; Oberflächenbelastung: 0,005-0,05 MPa).

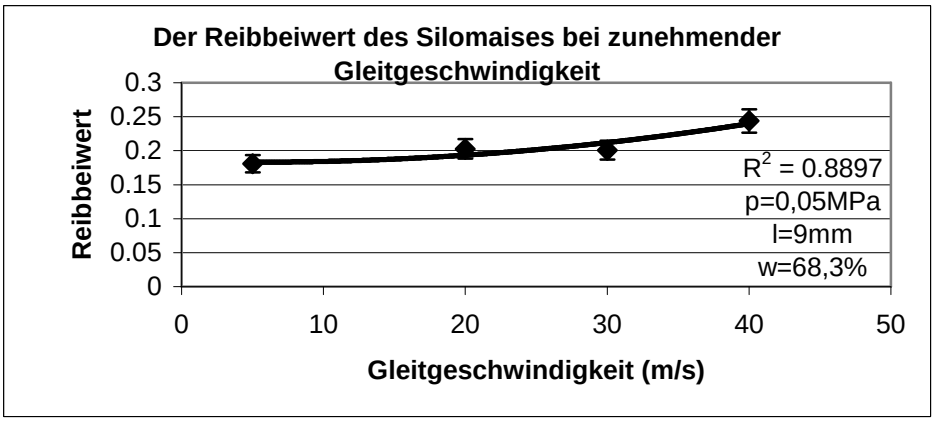
**2.** Es wurde bestimmt, dass der Reibungsfaktor des Feldgrases mit 17 mm Durchschnitthackenlänge und zwischen 50-70% Feuchtigkeit auf Stahl mit der Erhöhung von Oberflächenbelastung (0,005-0,05 MPa) mit ~20% abgenommen werden kann, und der des Silomaises mit 9 mm Hackenlänge neben der Erhöhung von Oberflächenbelastung mit ~30% abgenommen werden kann. Spezifische Energieanspruchabnahme wird neben größeren Gewichtsstrom bedeutend.






**3.** Es wurde bewiesen, dass der Reibungsfaktor des Feldgrases mit 17 mm Durchschnitthackenlänge und zwischen 50-70% Feuchtigkeit auf Stahl mit der Gleitgeschwindigkeit monoton zunimmt. Es beträgt schon ~50% neben Gleitgeschwindigkeitszunahme von 5 m/s auf 40 m/s. Das gleiche Phänomen ist beim Silomais mit 9 mm Durchschnittshackenlänge zu beobachten, wobei das Zunahmemaß in demselben Bereich kleiner ist (30%). Auf diesem Grund für Energieersparnis ist es empfohlen, die Strömungsgeschwindigkeit des Grünfutters in der Maschine z.B. mit größeren Durchflussquerschnitten zu reduzieren.






**4.** Der Reibungsfaktor des gehackseltem Feldgrases kann auf Stahloberfläche und auf wetten Basis in der Feuchte (w) mit dem folgendem quadratischen Polynom beschrieben werden:

$$\mu(w)=-0{,}004w^2+0{,}0324w+0{,}0217$$

Die Kurve hat bei 30 m/s, 0,03 MPa und 45% Feuchtigkeit einen Maximalwert. Eine Ernte kann erst über 45% Feuchtigkeit aus strömungsenergetischen Hinsichten als rentabel betrachtet werden.

**5.** Ich habe bestätigt, dass die Veränderung der Durchschnittshackenlänge von 4-19 mm in dem Betriebsbereich von Feldhäckslern zu keiner Veränderung in dem Reibungsfaktor führt (0,005 MPa, 30 m/s, 70%). Auf dieser Weise können meine Reibungsversuchen und Erfahrungen auch in dieser Richtung erweitert werden.

**6.** Es wurde bewiesen, dass der Reibungsfaktor neben der Paarung von PE-UHMW Kunststoff und Gras kleiner wird, als der zwischen Stahl und Gras. Der Reibungsfaktor ist bei PE-UHMW neben 45% Feuchte mit 40% weniger, als der bei Stahl. Das zeugte 10% weniger spezifische Energieverbrauch bei Feldversuchen. Leistungsverbrauch der Häckslertrommel und der Beschleunigungstrommel wird wegen des kleineren Reibungsfaktors abgenommen, daneben wurde auch der Hacken nur kaum gebremst. Die Differenz war nicht messbar zwischen die Paarungen von Silomais – PE-UHMW, und Silomais – Stahl.

**7.** Zweiphasenströmung von Hacken und Luft wurde auf dem Zellenrechner durch CFD+DEM gekoppelter Berechnungen modelliert. Es wurde durch das Eulersche Zweiphasenströmungssimulieren bewiesen, dass die Strömungsgeschwindigkeitsabnahme von Hacken auf ~5% beträgt, währen der durch die Reduzierung Strömt. Die an der Wand entstehende Bremskraft wird durch die ständig beschleunigte Luft bedeutend kompensiert.

# 4. Konsequenzen und Vorschläge

Wegen der erhöhten Durchlässigkeit der modernen Häcksler wurden die durch die Produktförderung entstehenden Verluste bedeutend zugenommen. Das Hacken muss erstmal auf zirka 60 m/s beschleunigt werden, der selbst schon eine ganz große Energieanlage bedeutet. Aber ein bedeutender Anteil dieser kinetischen Energie wird wegen der Reibung verloren oder wandelt sich in Wärme um.

Auf dem Grund meiner Forschungsarbeit wurde bestätigt, dass der Reibbeiwert des Hackens neben steigernder Gleitgeschwindigkeit zunimmt. Deswegen ist es vorgeschlagen, das Produkt nicht grenzenlos beschleunigen lassen. Das Hacken soll nur bis zum sicheren Produktförderung beschleunigt werden.

Die Gleitflächen stehen während der Reibung unter bedeutend abrasiven Wirkung. Die Untersuchungen haben beweist, dass die erhöhte Oberflächenrauheit während der Reibung zwischen Festkörpern einen günstigen Reibbeiwert ergeben, ist es bei gehäckseltem Grünfutter falsch. In diesem Fall hatte der Reibbeiwert der kleinste Wert neben feiner Oberflächenrauheit, deswegen die Gleitflächen müssen möglicherweise glatt ausgebildet werden, weil die auch das Hacken und der damit kommende Sand befördern.

Die Erntezeit des Hackens wird im Allgemeinen danach festgelegt, für welchen Zweck das Hacken in der Zukunft genutzt wird. Die Feuchtigkeit beeinflusst bedeutend den Reibbeiwert des Hackens, deswegen wenn es durch die Erntetechnologie gestattet ist, soll der Maximalpunkt vermeidet werden.

Gemäß meiner Messungen kann es eindeutig bestätigt werden, dass der Reibungsverlust mit der Verwendung von Kunststoffgleitflächen bedeutend gemindert werden kann. Dessen anderer Vorteil ist, dass das Produkt an seine Wände nur sehr schwer ankleben kann, deswegen während Grashacken rutscht das Produkt an sauberen Flächen, und dessen Strömung wird nicht durch Verstopfung gebremst.

Während meiner Forschungsarbeit wurde geklärt, dass bei diesen Maschinen und mit besonders hohem Durchlass auch der Reibungsverlust in Betracht gezogen werden muss. Der Reibungsverlust kann durch die oben genannten Vorschläge und die Optimierung von den Beugen (wie z.B. beim Ausblasturm) weiter verbessert werden. Auf dieser Weise kann der Kraftstoffverbrauch des Häckslers gemindert werden, und damit der Wirkungsgrad der Maschine gesteigert werden.

# 5. Zusammenfassung

Die gehackelte Ernte von Grünfutter braucht große Energieanlage. Ein bedeutender Motorleistungsanteil der Häckslereinheit wird auf das Produkthäckseln aufgewendet, und der andere auf die Produktförderung. Die Reibung bremst die Produktförderung, und es ist ein bedeutender Verlust. Neben Reibungsverlustabbau kann der Energieverbrauch des Häckselns gemindert werden, damit auch der Kraftstoffverbrauch der Häcksler reduziert werden kann.

In meiner Dissertation wurden die Minderungsmöglichkeiten des Reibungsverlustes untergesucht. Der Reibungswiderstand besteht aus zwei Komponenten: die eine ist die das Produkt an der Wand druckende Kraft, und die andere ist der zwischen das Hacken und die Gleitflächen entstehende Reibbeiwert. Der Wert der Normalkraft kann durch die geometrische Optimierung der Beugen gemindert werden, deswegen wurde die Optimierung des Ausblasturmes in Rahmen meiner Dissertation durchgeführt. Als deren Erfolg konnte der Reibungsverlust mit 10% reduziert werden. Solche Optimierung kann auch bei den anderen Einzelteilen der Maschine und zwischen die geometrischen Grenzen durchgeführt werden. Auch die Simulation von dem Produktstrom in der Maschine gehört zu diesem Thema, die die Strömungsverhältnisse sowohl des Hackens als auch der Luft zeigen kann. Die Hackengeschwindigkeit und die Luftströmung können durch meine gekoppelten DEM-CFD Simulation nachvollziehen werden.

Die Bestimmung des Reibbeiwerts bedeutet eine komplizierte Aufgabe, weil die von mehreren Parameter abhängt. Ein neues Messgerät wurde entwickelt, damit der Reibbeiwert zwischen das Hacken und verschiedenen Gleitflächen ermittelt werden kann. Die Gleitgeschwindigkeit und die Belastung können während der Messungen in breitem Bereich verändert werden. Gleitfläche kann in diesem Fall beliebig ausgewählt werden.

Während meiner Messungen wurde der Reibbeiwert nach variable Gleitgeschwindigkeit, Oberflächenbelastung, Feuchtigkeit, Oberflächenrauheit und Hackenlänge untersucht. Die Messungen wurden durch Feldgras und Silomais durchgeführt. Gemäß die Untersuchungen konnte es eindeutig bestätigt werden, dass obwohl das Gras einen ziemlich großen Reibbeiwert (0,7-0,8) hat, der von Mais war nur zwischen 0,2 und 0,3. D.h., dass das Maishäckseln weniger Reibungsverlust hat, und das Hacken strömt in der Maschine mit höherer Geschwindigkeit. Die Beeinflussung der Einstellungsparameter wurde auch in der Messung untersucht. Demnächst konnte es bestätigt werden, dass der Reibbeiwert neben steigernder Oberflächenbelastung abnimmt. Die steigernde Gleitgeschwindigkeit bedeutet

zunehmenden Reibbeiwert. Diese Tendenzen waren sowohl beim Gras als auch beim Mais gültig.

Auch die Feuchtigkeit beeinflusst diesen Wert bedeutend. Neben Gras konnte es bestätigt werden, dass die Reibbeiwertänderung parabolisch ist, und hat sein Maximalwert zwischen 40-50% Feuchtigkeit. Die Untersuchungen mit Silomais wurden bis zum 53% Feuchtigkeit durchgeführt, und hier die abnehmende Feuchtigkeit ergibt steigernden Reibbeiwert. Veränderung der Hackenlänge verursacht in dem Betriebsbereich keine messbare Änderung in dem Reibbeiwert. Zunehmende Oberflächenrauheit der Gleitflächen verursacht steigernde Reibbeiwertmesswerte. Gemäß den Messungen mit verschiedenen Scheibenstoffen ist es eindeutig zu bestätigen, dass der Reibbeiwert beim Gras neben den Polyamid und Polyethylen Gleitflächen viel mehr weniger ist, als der beim Stahl. Feldversuchen wurden gemäß den Laboruntersuchungen durchgeführt, damit die vorteilhaften Gleiteigenschaften von UHMW Polyethylen beweisen können. Während dessen wurde ein Feldhäcksler ganz mit dem METALEN 1 Polymer ausgekleidet, und es resultiert beim Gras 10-15% Leistungsgewinn, das auch unter Laborverhältnisse beweist werden konnte. Während Silomaisverkleinerung konnte kein bedeutend Unterschied zwischen die Kunststoff- und Stahlscheibe erzeigt werden.

Während den Feldversuchen konnte ein anderer Vorteil der Kunststoffgleitflächen bewiesen werden, und zwar das Gras klebt gar nicht oder nur kaum an die Wand an. Das ist sehr wichtig, weil es neben Stahlwand dazu sehr geneigt ist, und es kann in Kürze zur totalen Verstopfung führen.

Während meiner Forschung wurde die Reibbeiwertänderung in dem Betriebsbereich eines Feldhäckslers neben Parameteränderungen aufgenommen. Daneben wurde mit der Analyse und Optimierung der Strömungen in der Maschine gestartet, aber diese Untersuchung komplettieren zu können sind noch weitere Untersuchungen nötig.

# 6. Publikations

***Lektorált cikk világnyelven:***

**Kajtár**, **P.,** Szendrő, P., Haffert, A.: Reduction of Friction and Cutting Losses in Forage Harvesters. Hungarian Agricultural Engineering Gödöllő 2007/20 p 46-47.

**Kajtár**, **P.,** Haffert, A., Szendrő, P.: Messung des Reibbeiwertes von gehäckselten Materialien. Landtechnik Darmstadt 2009/1 p 33-35

**Kajtár**, **P.,** Haffert, A., Szendrő, P.: Measuring the coefficient of friction of chopped materials. Mechanical Engineering Letters 2009/Volume 2 p 255-259

***Lektorált cikk magyar nyelven:***

**Kajtár P.**, Szendrő P.: Új lehetőségek az energiatakarékos terményaprításban. GÉP folyóirat LVII. Évfolyam, 2007/4 Budapest p 23-30.

**Kajtár P.**, Szendrő P.: A járvaszecskázók belső veszteségeinek mérséklése. Mezőgazdasági technika Gödöllő 2009/12 p 2-3

# 7. Dankesbezeigung

Ich möchte die Arbeit von Dr. Péter Szendrő bedanken, damit er als Themenleiter meine Arbeit untergestützt hat, meine Forschungen geleitet hat und half mir meine Dissertation bereitzustellen.
Besonders bedanke ich die Unterstützung von Herrn Dr. Andreas Haffert und Herrn Dr. Ingo Bönig, die mir ermöglicht haben, damit ich in Deutschland komme und in der Entwicklungsforschung von CLAAS teilnehme. Die beide haben mir als Mitthemenleiter in meiner Arbeit geholfen. Ich danke die Unterstützung von der Vorentwicklungsabteilung von CLAAS. Ich danke Ihnen dafür, dass meine Labormesseinrichtung fertiggestellt werden konnte, und die Feldversuche mit den Änderungen an dem Feldhäcksler durchgeführt werden konnte.
Ich danke für die Aufnahme und Unterstützung von dem Institut für Mechanik und Maschinenbau.
Daneben danke ich den anderen Mitarbeitern der Fakultät von Maschinenbau für die nützliche Ratschläge und Anmerkungen, damit sie meine Forschungsarbeit noch mehr erfolgsreich gemacht haben.
Zum Letztens, aber nicht zum Ende bedanke ich meiner Eltern und meiner Freunde, damit sie bis zum Schluss neben mir gestanden sind und mich befördert haben.