

Sebastian Kemper, Thorsten Lang[†] und Ludger Frerichs

Der überlagerte Schnitt im Scheibenmähwerk – Ergebnisse aus Feldversuchen und Simulation

Moderne Kreiselmäherwerke nutzen den seit Jahrzehnten bekannten Schneidvorgang des freien Schnitts. Sie arbeiten damit schlagkräftig und zuverlässig, allerdings mit hohem energetischen Aufwand und oftmals eingeschränkter Schnittqualität.

Um den Schneidprozess zu optimieren, wurde ein Schnittprinzip entwickelt, das die Prinzipien freier Schnitt und Messerschnitt mit Gegenschneide kombiniert. Darauf aufbauend wurde ein Funktionsmuster konstruiert. Der Schneidprozess basiert auf zwei vertikal übereinander angeordneten Mähscheiben mit mehreren Klingen. Mit verringerten Schnittgeschwindigkeiten sollen die energetische Effizienz und die Schnittqualität verbessert werden.

eingereicht 6. Mai 2014

akzeptiert 30. Juni 2014

Schlüsselwörter

Scheibenmähwerk, überlagertes Schnitt, Diskrete-Elemente-Methode

Keywords

Disc mower, overlaid cut, Discrete Element Method

Abstract

Kemper, Sebastian; Lang, Thorsten[†] and Frerichs, Ludger

The overlaid cut in a disc mower – results from field tests and simulation

Landtechnik 69(4), 2014, pp. 171–175, 6 figures, 4 references

Modern rotary mowers are well known in green forage harvesting. These machines are powerful and reliable, but energy consumption is high and cutting quality is restricted. To optimize the process, an overlaid cutting principle was developed and realized as functional prototype. This cutting method is characterized by two vertical arranged mowing discs with several blades. Thus with reduced cutting speeds the energy efficiency and the cutting quality could be improved.

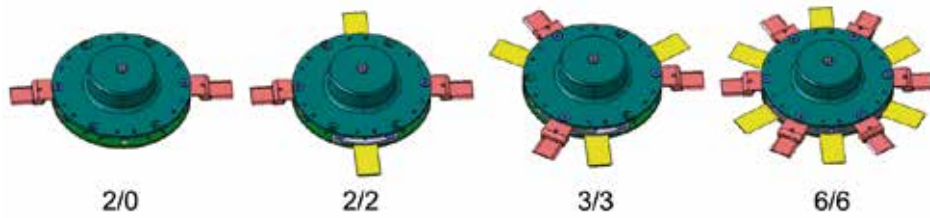
■ Kreiselmäherwerke sind in der Grünfütterernte weit verbreitet und haben sich nicht zuletzt aufgrund ihrer hohen Flächenleistung gegenüber dem Messerbalken durchgesetzt. Scheibenmäherwerke arbeiten infolge hoher Schnittgeschwindigkeiten mit hohem energetischen Aufwand und mit Verlusten [1]. Schnittgeschwindigkeiten von ca. 80 m/s sind erforderlich, um die Trägheits- und Biegekräfte der Halme als Gegenkräfte für den Schnitt zu nutzen, damit auch unter schlechten Erntebedingungen bzw. mit unscharfen Klingen zuverlässig geschnitten werden kann. Eine alleinige Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit zur Steigerung der Energieeffizienz und Verringerung der Bröckelverluste würde beim bestehenden Schneidvorgang eine Verschlechterung der Mähqualität und der Einsatzsicherheit mit sich bringen und wäre somit nicht zielführend.

Ein Ansatz zur Reduktion der energetischen Verluste besteht darin, einen modifizierten Schneidprozess zu konzipieren. Konventionelle Mäherwerke nutzen den freien Schnitt, also eine Schneidart ohne Gegenschneide. Durch die Integration einer zweiten Messerebene in den Schnittprozess kann ein überlagertes Schnitt erreicht werden, der sich aus den Prinzipien Messerschnitt mit Gegenschneide und freier Schnitt zusammensetzt. Das überlagerte Schneidverfahren wurde mithilfe eines Funktionsmusters in Feldversuchen mit Gras untersucht. Parallel dazu entstand ein Simulationsmodell auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode (DEM), um den Schneidprozess losgelöst von äußeren Einflussgrößen zu untersuchen.

Vorüberlegungen und Aufbau des Versuchsträgers

Die zweite Messerebene im Schnittprozess wird durch zusätzliche Klingen gebildet, die sich unterhalb der herkömmlichen Klingen befinden. Die Grashalme werden entweder von der

Abb. 1



Messerkonfigurationen der Mäheinheiten (Messeranzahl oben/unten)

Fig. 1: Blade configuration of the cutting units (No. of upper/lower blades)

oberen oder der unteren Klinge (freier Schnitt) bzw. von beiden Klingen zeitgleich geschnitten. Bei gleichsinnig rotierenden Klingen drehen die Messer mit unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit, um eine Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Ebenen zu generieren. Die langsamere der beiden Klingen fungiert in den entsprechenden Betriebspunkten als Gegen-schneide. Bei gegensinnig drehenden Klingen können die absoluten Messergeschwindigkeiten reduziert werden, ohne dass sich die Relativgeschwindigkeiten ändern.

Die beiden Klingenebenen werden durch zwei Mähscheiben realisiert. Beide Mähscheiben sind koaxial übereinander angeordnet und bilden eine „Mäheinheit“. Drehzahl und Drehrichtung der beiden Mähscheiben können unabhängig voneinander vorgegeben werden, da im Funktionsmuster keine feste Übersetzung zwischen den Mähscheiben besteht.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch vier Mäheinheiten mit unterschiedlichen Messerkonfigurationen. Die Zahlenangaben unter den Mäheinheiten geben die Anzahl der Messer an den beiden Mähscheiben an. Die erste Zahl steht für die Anzahl der Messer an der oberen, die zweite für die an der unteren Scheibe. Pro Mähscheibe können entweder zwei, drei oder sechs Klingen montiert werden können. Die maximale Klingenzahl wurde auf sechs begrenzt, um bei den praxisüblichen Klingendurchmesser einen ausreichenden Freiraum vorzusehen, sodass sich kämmende Messer nicht berühren. Sind drei oder sechs Messer montiert, so ist eine Pendelbewegung um

den Aufnahmepunkt der Messer nur eingeschränkt möglich. Die Pendelbewegungen der Messer wurden während der Feldversuche blockiert, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten. Mit diesem Konzept kann auch der freie Schnitt realisiert werden, indem die Klingen an der unteren Mähscheibe, die in diesem Fall still steht, demontiert werden. Weitere Informationen zum Mähbalkenaufbau und dem Antrieb der Mähscheiben enthält [1].

Ein mobiler Messwagen ist am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig mit einer Rahmenkonstruktion und einem Mähbalken ausgerüstet worden, der drei Mäheinheiten nebeneinander aufnimmt (**Abbildung 2**). Dieser Wagen wird aufgesattelt mit dem Traktor verbunden und von diesem mit hydraulischer und elektrischer Energie versorgt. Die Arbeitsbreite des Versuchsträgers ist konzeptbedingt auf 1,1 m begrenzt. Damit sich die Messerbahnen der äußeren Klingen stets innerhalb der zu bearbeitenden Fläche befinden, wurde der Mähscheibendurchmesser gegenüber praxisüblichen Abmessungen angepasst.

Die unteren und oberen Scheiben werden jeweils von einem Hydraulikmotor angetrieben. Der stufenlose Antrieb erlaubt eine flexible Vorgabe der Rotations- und damit der Schnittgeschwindigkeit, sowohl für gleich- als auch für gegensinnig rotierende Mähscheiben. Drucksensoren im Vor- und Rücklauf der Hydraulikmotoren sowie in die Motoren integrierte Drehzahlsensoren ermöglichen die Berechnung der Antriebsleis-

Abb. 2



Versuchsträger mit Funktionsmuster-Mähwerk (links) und Mähbalken mit Mähscheiben „2/2“ (rechts) (Fotos: S. Kemper)

Fig. 2: Test machine with functional prototype mower (left) and mower bar with cutting units „2/2“ (right)

tung, die für einen relativen Vergleich unterschiedlicher Versuchskonfigurationen herangezogen wird.

Darüber hinaus werden für ausgewählte Parametervariationen Videokameras und eine Hochgeschwindigkeitskamera angebaut, um den überlagerten Schnitt und den Gutfluss visuell untersuchen und dokumentieren zu können.

Feldversuche

Der überlagerte Schneidprozess wurde in mehreren Versuchsreihen auf einem Feld mit einjährigem Weidelgras untersucht. Um unterschiedliche Versuchskonfigurationen gegeneinander abzugrenzen, wurde das Versuchsfeld in Versuchspartellen gegliedert, denen jeweils ein Beschleunigungsstreifen vor- und ein Verzögerungsstreifen nachgelagert waren. Dadurch konnten in den Testreihen eine annähernd konstante Mähgeschwindigkeit von 12 km/h erreicht werden.

Durch die unterschiedlichen Konfigurationsvarianten ergibt sich eine große Anzahl möglicher Versuchseinstellungen. Um diese auf ein handhabbares Maß zu reduzieren, wurde die Design-of-Experiments-Methode (DOE) angewendet, die es erlaubt, den Einfluss von Eingangsgrößen auf Ausgangsgrößen zu ermitteln. Durch diese Vorgehensweise konnten zwei Versuchsreihen abgeleitet werden, die jeweils eine definierte Anzahl an Einzelversuchen umfassten [2].

In der ersten DOE-Versuchsreihe sollten die Schnittgeschwindigkeiten und die Klingenzahl der oberen und unteren Scheibe für einen möglichst leistungsarmen Schneidprozess identifiziert werden. Dafür wurden gleich- und gegensinnig rotierende Scheiben untersucht und die Schnittgeschwindigkeit zwischen 20 und 50 m/s verändert. In den Versuchen wurden entweder zwei, drei oder sechs Klingen pro Mähscheibe eingesetzt. Messungen haben ergeben, dass für einen möglichst leistungsarmen Mähprozess die Klingenzahl an der oberen Mähscheibe hoch und an der unteren Scheibe hingegen klein sein sollte. Gleichsinnig rotierende Scheiben erfordern eine geringere Antriebsleistung als gegensinnig rotierende Scheiben.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine weitere Versuchsreihe mit fester Konfiguration der Messer und der Drehrichtung aufgestellt, die während der Versuche nicht verändert wurde. Die oberen Scheiben wurden mit sechs und die unteren mit zwei Klingen ausgestattet. Das Ziel war, den Einfluss der Schnittgeschwindigkeiten der beiden Messerebenen genauer zu untersuchen, da die erforderliche Antriebsleistung dadurch maßgeblich beeinflusst wird. Die minimale Schnittgeschwindigkeit wurde gegenüber der vorherigen Versuchsreihe auf 10 m/s halbiert. Diese Schnittgeschwindigkeit stellt die minimal mögliche des Versuchsaufbaus dar.

Neben der Leistungsmessung wurden alle Versuchspartellen einer Bewertung unterzogen, um Informationen über die Mähqualität abzuleiten. Die Mähqualität wurde als eine Kennzahl definiert, die Aussagen über das Schnittbild, die Schnittfläche und die Gutablage zusammenfasst. Vorrangig wurde die geschnittene Feldfläche und weniger die des geschnittenen

Gutes beurteilt. Folgende Kriterien wurden bei der Bewertung zugrunde gelegt:

- Längenverteilung der geschnittenen Halme in Fahrt- und Querrichtung
- Unterschiede im Höhenprofil zwischen Blatt und Pflanzenstängel
- Schnittfläche der Blätter
- Menge nicht geschnittener Halme
- Gutablage

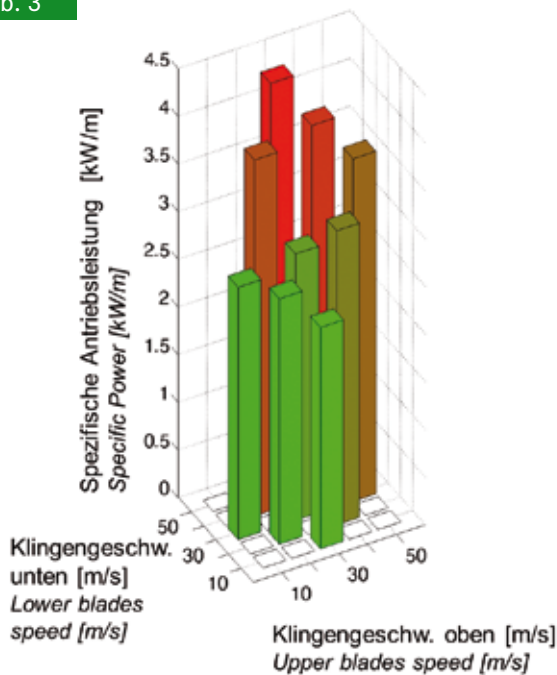
Bei der Längenverteilung wurde ein ebenes Schnittbild positiv und ein welliges negativ bewertet. Ebenfalls negativ wurden deutlich variierende Schnitthöhen von Stängel und Blatt bewertet. Je nach Versuchskonfiguration waren keine oder viele ungeschnittene Halme zu finden, was ebenfalls berücksichtigt wurde. Die Gutablage wurde gut bewertet, wenn ein ausgeprägter Schwad zu erkennen war und schlecht, wenn das geschnittene Gras breitflächig über die Arbeitsfläche verteilt war. Eine Schnittfläche wurde danach bewertet, ob ein glatter Schnitt zu erkennen war oder ausgeprägte Ausfransungen aufwies. Alle Kriterien wurden mit Noten belegt, wobei 1 die beste Note und 5 die schlechteste Note darstellte. Aus diesen Bewertungen wurde ein Mittelwert für jede Versuchspartelle gebildet, der als Kennzahl für die Mähqualität herangezogen wurde. Die Bewertung wurde von mehreren Personen vorgenommen. Die Ergebnisse wurden für jede Versuchseinstellung gemittelt und schließlich auf den Bestwert der Versuchsreihe normiert.

Versuchsergebnisse

Das Diagramm in **Abbildung 3** zeigt als Ergebnis für die Leistungsmessung die spezifische Leistung in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit, wobei die spezifische Leistung aus der summierten Antriebsleistung der beiden Messerebenen bezogen auf die Arbeitsbreite ermittelt wurde. Mit steigenden Schnittgeschwindigkeiten sind höhere Antriebsleistungen erforderlich. Dieses gilt sowohl für die unteren als auch für die oberen Klingen. Zu erkennen ist, dass die unteren Mähscheiben einen größeren Einfluss auf die Antriebsleistung haben als die oberen. Der Betriebspunkt mit 40 m/s Schnittgeschwindigkeit für die oberen Klingen und 20 m/s für die unteren Klingen ist beispielsweise weniger leistungsintensiv als umgekehrt. Die spezifischen Leistungen liegen für diese Messreihe im Bereich von 2,3 bis 4,3 kW/m.

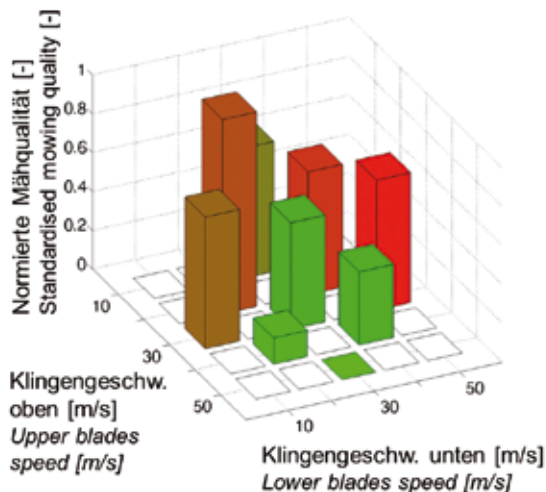
In **Abbildung 4** ist die auf den Bestwert normierte Mähqualität gezeigt. Die beiden Schnittgeschwindigkeitsachsen in **Abbildung 3** und **Abbildung 4** sind gegeneinander verdreht dargestellt. Für sich betrachtet wird die beste Mähqualität bei 50 m/s Schnittgeschwindigkeit für die oberen und 30 m/s für die unteren Klingen erreicht. Tendenziell führt ein höherer Leistungseinsatz zu einer besseren Mähqualität (**Abbildung 3**). Wird die normierte spezifische Leistung in Kombination mit der Mähqualität unter gleichwertiger Gewichtung betrachtet, so kann ein Betriebspunkt gefunden werden, der einen Kompromiss aus geringer Antriebsleistung und guter Mähqualität darstellt. Die

Abb. 3



Spezifische Leistung des 6/2 Mähbalkens
Fig. 3: Specific power of the 6/2 mower bar

Abb. 4

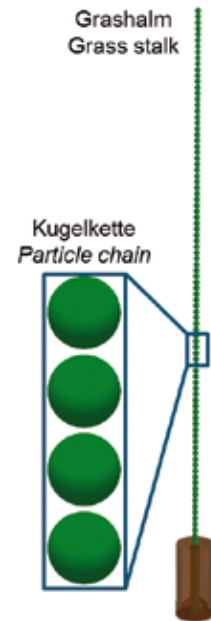


Normierte Mähqualität des 6/2 Mähbalkens
Fig. 4: Standardised mowing quality of the 6/2 mower bar

günstigste Konfiguration weist eine Schnittgeschwindigkeit von 40 m/s für die oberen und 20 m/s für die unteren Klingen auf.

Über alle Versuche betrachtet lag die spezifische Antriebsleistung zwischen 2,3 und 7,6 kW/m. Für den freien Schnitt wurden in Referenzversuchen 5,5 kW/m gemessen. Die Referenzversuche für den freien Schnitt wurden mit zwei Klingen pro Mähscheibe und 75 m/s Schnittgeschwindigkeit auf derselben Versuchsmaschine durchgeführt. Da nur eine Messerebene erforderlich war, wurden die unteren Mähscheiben ausgebaut.

Abb. 5



DEM Simulationsmodell eines Grashalms
Fig. 5: DEM simulation model of a grass stalk

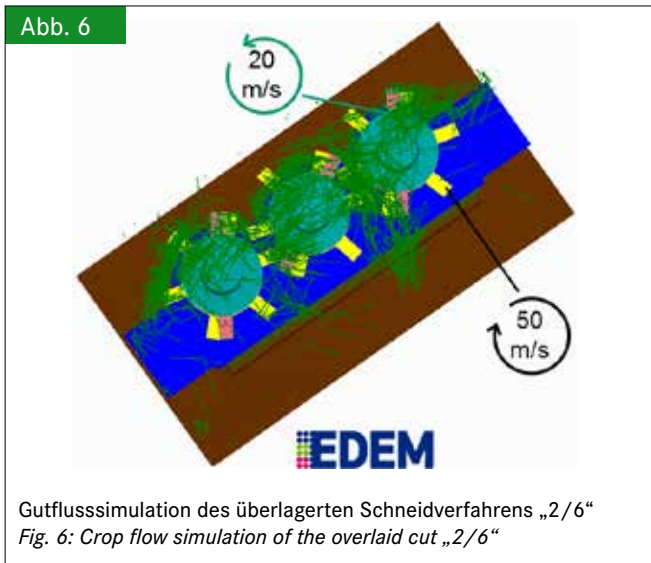
Die Mähqualität lag für den überlagerten Schnitt im Bereich von 2,1 bis 3,4. Der freie Schnitt wurde mit 2,5 bewertet. Die Qualitätsunterschiede beim überlagerten Schnitt sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Grashalme bei langsamen Schnittgeschwindigkeiten nicht mehr unmittelbar vor dem Mähbalken geschnitten werden, sondern teilweise während des Überstreichens des Mähbalkens. Folglich ergeben sich unterschiedliche Schnitthöhen.

Diskrete-Elemente-Simulation des Mähprozesses

Neben den praktischen Versuchen ist der überlagerte Schneidprozess mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) untersucht worden. Dafür wurden Simulationsmodelle entwickelt, die einerseits die Geometrie der Mähscheiben und Klingen und andererseits die durch Kugelstrukturen nachgebildeten Grashalme enthalten. Der Fokus der Simulation lag auf der Untersuchung des überlagerten Schnitts bei unterschiedlicher Messerkonfiguration sowie auf der Gutförderung über den Mähbalken.

Die Grashalme werden als aneinandergereihte Partikel (Kugeln mit einem Durchmesser von 3 mm) modelliert, die über flexible Bindungen miteinander verbunden sind (**Abbildung 5**). Auf Basis verschiedener DEM-Untersuchungen und Parametervariationen kann ein realistisches Verhalten beim Schnitt nachgebildet werden. Für einen 345 mm langen Halm sind unter Berücksichtigung der Kugelabstände etwa 100 Partikel erforderlich. Die Parameter zur Abbildung der Pflanzeigenschaften wurden unter anderem aus den Veröffentlichungen von Ahlgrim und McRandal abgeleitet [3; 4].

Abb. 6



Wie bei den praktischen Versuchen sind die drei nebeneinander angeordneten Mäheinheiten auch im Simulationsmodell zu finden. Zur Begrenzung der Rechenzeit wird für die Untersuchung des Gutstroms ein Ausschnitt eines Feldes mit einer Fläche von 0,35 m² bzw. ca. 1 500 Grashalmen betrachtet. In Anlehnung an die Feldversuche wird die Mähgeschwindigkeit auch in der Simulation auf 12 km/h festgelegt. In diesem Projekt wurde die Software EDEM[®] von DEM-Solutions Ltd. verwendet.

Abbildung 6 zeigt eine Momentaufnahme des simulierten Mähvorgangs mit gegensinnig rotierenden Mähscheiben. Die oberen Klingen (in Rot) weisen eine Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s auf und bewegen sich damit deutlich langsamer als die unteren Klingen (in Gelb) mit 50 m/s. Die Klingenzahl an den unteren Scheiben ist mit sechs dreimal so hoch wie an den oberen. Diese Konfiguration stellt einen Betriebspunkt dar, der eine große Störwirkung auf einen geordneten Gutstrom ausübt. Die visuelle Betrachtung des Simulationsprozesses zeigt, dass die langsamer rotierenden Mähscheiben ihren dominierenden Einfluss auf den Gutstrom behalten. Die in Mährichtung zusammenlaufenden oberen Scheiben (**Abbildung 6**, rechts) fördern den größten Anteil der geschnittenen Halme. Die auf der linken Seite zusammenlaufenden unteren Mähscheiben fördern hingegen nur wenig Grashalme über den Mähbalken. Dieser Effekt konnte auch bei den Feldversuchen beobachtet werden.

Schlussfolgerungen

Der überlagerte Schneidvorgang im Scheibenmäswerk zeichnet sich durch zwei koaxial übereinander liegende Mähscheiben aus. Es konnte gezeigt werden, dass die Antriebsleistung beim überlagerten Schnitt mit zwei Messerebenen und mehreren Klingen gegenüber dem konventionellen freien Schnitt bei gleichbleibender Schnittqualität reduziert werden kann. Neben diesen Grundlagenuntersuchungen sind Fragen im Hinblick auf den praktischen Einsatz zu beantworten: Vor allem bei gegensinnig rotierenden Scheiben besteht ein höheres Risiko von

Kontakten mit Fremdkörpern und Klingenschäden. Darüber hinaus können der Verschleiß an den Klingen und Klingenverformungen beim Schnitt dazu führen, dass sich die zwei Millimeter voneinander entfernten Klingen im Betrieb berühren.

Für weiterführende Betrachtungen wurde das Mähkonzept mit der Diskrete-Elemente-Methode modelliert. Die Grashalme sind aus aneinandergereihten Partikeln aufgebaut worden, um die Gutförderung des geschnittenen Grases über den Mähbalken bei unterschiedlichen Drehzahl- und Klingenkombinationen zu untersuchen. Mit diesem Simulationsmodell können geänderte Klingen-, Mähscheiben- und Mähbalkenformen sowie Schnittgeschwindigkeiten bereits vor dem praktischen Einsatz simulativ untersucht und bewertet werden.

Literatur

- [1] Kemper, S.; Lang, T.; Frerichs, L. (2012): Untersuchungen zur Schnittüberlagerung am Kreiselmähwerk. *Landtechnik* 67(5), S. 346–349
- [2] Siebertz, K.; Van Bebber, D.; Hochkirchen, T. (2010): *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Springer
- [3] Ahlgrimm, H.-J. (1974): Kraft-Dehnungsverhalten von Einzelgrashalmen. *Landbauforschung Völkenrode* 24(2), S. 105–110
- [4] McRandal, D.M.; McNulty, P.B. (1978): Impact Cutting Behaviour of Forage Crops. *Journal of agricultural Engineering Research* 23, pp. 313–328

Autoren

Dipl.-Ing. Sebastian Kemper ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang** war außerplanmäßiger Professor und **Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: s.kemper@tu-braunschweig.de, <http://www.tu-braunschweig.de/imn>.

Danksagung

Das vorgestellte Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert und von der Firma Sauer-Danfoss mit Sachmitteln unterstützt.