Wirkung eines Multi-Enzympräparates auf das rheologische Verhalten von Flüssigfutter

Meno Türk[1*] und Stefan Jakob [2]

[1] Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim e. V., Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, Germany

[2] Adisseo France S.A.S., 42 Avenue Aristide Briand, F-92160 Antony, France

Kurzfassung - Abstract

Die viskositätssenkende Wirkung eines NSP-spaltenden Multi-Enzympräparates in Flüssigfutter wurde mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters untersucht. Dabei wurden mit derselben Probe zuerst eine Rührkurve und anschließend eine Fließkurve aufgenommen. Die Enzymwirkung ist abhängig von der Getreideart, der Rührzeit, der Scherbelastung, dem TS-Gehalt, dem pH-Wert und der Temperatur. Diese Einflussgrößen wurden mit Weizen- und Gerstenfuttermischungen systematisch untersucht und die optimalen Wirkungsbedingungen ermittelt. Besondere Bedeutung auf die Enzymwirksamkeit bei der Viskositätsuntersuchung hat der pH-Wert, wie ein Ansäuern des Flüssigfutters auf pH < 5,3 zeigte. Die Enzymwirkung ist bei Flüssigfutter auf Gerstenbasis stärker ausgeprägt als bei Weizenfutter. Die Viskosität lässt sich um maximal 40 % vermindern. Die Enzymwirkung verstärkt sich mit steigendem TS-Gehalt und wird auch von der Rührzeit und dem Schergradienten beeinflusst.

Schlüsselwörter: Viskosität, Flüssigfutter, Fließverhalten, Enzyme

Effect of a multi-enzyme preparation on rheological behaviour of liquid feed

The effects of a multi-enzyme preparation for splitting of non-starch polysaccharides (NSP) on reduction of liquid feed viscosity are measured with a rotary viscometer. Once the mixing curve has been recorded, a flow curve is measured on the same sample. The action of the enzyme depends on cereal type, mixing time, shear rate, dry matter contents, pH value and temperature. These parameters were tested and the optimal conditions of the enzyme effects were determined. The influence of pH on the enzyme efficiency is very distinct. The best effect was obtained with wheat and barley water suspensions at pH values of < 5.3. The enzyme effect on barley suspensions is more pronounced than it is on wheat water suspensions. Viscosity was reduced by up to 40 %. The enzyme effects further depend on the dry matter contents, the shear rate and the mixing time.

Keywords: Viscosity, liquid feed, flow behaviour, enzyme

1 Problemstellung

Die Getreidefütterung ist in der Schweine- und Geflügelhaltung weit verbreitet. Die Futterverteilung erfolgt zumeist mit Hilfe vollautomatischer Anlagen, die über Prozessrechner gesteuert werden. Bei der Flüssigfütterung von Schweinen werden trockene, feuchte und flüssige Futterkomponenten nach Programm im Wiegemischer vermischt und mit Hilfe von Kreisel- oder Drehkolbenpumpen durch Rohrleitungen in die Ställe gefördert. In Abhängigkeit von der Futteraufnahme, vom Stallklima, von den Inhaltsstoffen der Futterkomponenten, von der Gruppengröße und anderen Faktoren kann die Futterzusammensetzung und die Futtermenge stets neu berechnet und variiert werden.

Das Flüssigfutter besteht in der Regel aus verschiedenen Getreideschroten sowie Zusatzstoffen und Wasser. Zuweilen kommen auch weitere alternative Futterkomponenten hinzu. Diese Flüssigfuttermischungen haben je nach Wasseranteil eine dünnflüssige bis dickbreiige Konsistenz und werden rheologisch als nicht-Newtonsche Suspensionen mit pseudoplastischem oder nicht-linear plastischem Fließverhalten klassifiziert. Sie sind fein bis grob strukturiert, neigen zur Sedimentation und können im Extremfall auch thixotrope Eigenschaften aufweisen (Türk 1993).

Die Anwendung von Enzymen ist in der Futtermittelindustrie weit verbreitet. Sie können nur auf ganz bestimmte chemische Prozesse, bei bestimmter Konzentration und unter genau definiertem Milieu (pH, Temperatur, Reaktionszeit) optimal wirken (Uhlig 1991). In der Tierernährung werden Enzyme u. a. zur Verbesserung der Futterverdaulichkeit eingesetzt (Christensen 1989, Schurz 2000). Dadurch soll die Viskosität des Darminhalts vermindert und der Futteraufschluss sowie die Nährstoffaufnahme verbessert werden. Dies geht in den letzten Jahren aus umfangreichen Verdauungsversuchen im Bereich der Geflügelhaltung (Hetland et al. 2004, Amad 2001) und der Ferkelfütterung (Jakob et al. 2003, Jakob et al. 2005b, Harder & Bouvy 1991, Schuster 2003) hervor. Der Effekt der Viskositätsminderung im Flüssigfutter wurde

* Corresponding author. Tel. ++49 (0) 331 5699 513; Fax: ++49 (0) 331 5699 849; E-mail: mtuerk@atb-potsdam.de

bislang noch nicht systematisch gemessen und hinsichtlich der technologischen Wirkungen beschrieben.

Über rheologische Untersuchungen zum Einsatz von Stärke spaltenden Futterenzymen wurde bereits berichtet (Türk & Heinzl 2001). Nicht-Stärke-Polysaccharide (NSP) in Getreide und Ölschroten sind maßgeblich für die Viskosität, also das rheologische Verhalten, des Flüssigfutters verantwortlich.

Um die Pumpfähigkeit zu sichern, sollte die Viskosität nicht zu hoch sein, das heißt ein bestimmter Wasseranteil darf nicht unterschritten werden. Bei Getreideflüssigfütterung liegt das Trockenfutter : Wasser-Verhältnis im Bereich von 1 : 2 bis 1 : 3. Ein höherer Wasseranteil steigert die Sedimentationsneigung, verringert die Nährstoffkonzentration des Futters und führt zu höherem Gülleanfall. Ein zu geringer Wasseranteil (TS > 35 %) kann andererseits zu Problemen beim Pumpeneinsatz und beim gleichmäßigen Verteilen im Trog führen.

Die Firma *Adisseo France SAS* (Anonymous 2003) stellt ein NSP-spaltendes Multi-Enzympräparat her, bestehend u. a. aus Xylanasen, β-Glukanasen, Pektinasen, Proteasen, die von dem natürlich vorkommenden und genetisch unveränderten Mikroorganismus *Penicillium funiculosum* gebildet werden. Damit kann die Viskosität von Flüssigfutter vermindert werden und es wird dem Schweinehalter ermöglicht die Pumpfähigkeit auch bei verringertem Wasseranteil zu gewährleisten. Folgende Verbesserungen in der Fütterungstechnologie werden erwartet:

- Verbesserung der Fließfähigkeit, also Senkung der Viskosität von Flüssigfutter,
- geringerer Wasserbedarf zur Futteranmischung,
- bessere Futterverwertung in der Schweine- und Geflügelhaltung,
- geringerer Energiebedarf beim Anmischen und Pumpen,
- verminderte Verstopfungsneigung von Pumpen und Rohrleitungen,
- geringerer Gülleanfall und damit verminderte Kosten für Lagerung und Ausbringung,
- stabile Tiergesundheit durch bessere Darmtätigkeit,
- verbesserte tierische Leistungen.

Durch rheologische Vergleichsuntersuchungen wurden die Enzymwirkungen auf verschiedene Getreidefuttermittel, vor allem Weizen- und Gerstenfuttermischungen, hinsichtlich optimaler Anwendungsbedingungen untersucht und bewertet. Dabei wurden die aus Tierversuchen erhaltenen optimalen Enzymdosierungen nicht verändert, sondern pH-Wert, TS-Gehalt des Futters, Scherzeit und Schergradient variiert. Das Ziel ist es, die Wirkung eines Enzympräparates auf das Fließverhalten von Flüssigfutter in Ergänzung zu den bekannten Fütterungs- und Verdauungsversuchen (Jakob et al. 2003, Jakob et al. 2005a) einzuschätzen und Schlussfolgerungen für die Flüssigfütterungstechnologie abzuleiten. Dabei stehen Fragen der Energieeinsparung beim Mischen und Pumpeneinsatz im Vordergrund. Gleichzeitig können mögliche Wassereinsparungen bei gleichbleibendem Fließverhalten von wirtschaftlichem Interesse sein. Mit Hilfe dieser Informationen lassen sich Anwendungsempfehlungen für Hersteller und Nutzer präzisieren.

2 Material und Methoden

Im Gegensatz zu Senge et al. (1996), die eine repräsentative Viskosität im Modellprozess aufnehmen, werden in dieser Arbeit neben Rührkurven auch repräsentative Fließkurven gemessen. Die Standardversuche erfolgten mit Hilfe eines rechnergestützten Rotationsviskosimeters: Typ MC 1/RM 300 der Fa. PHYSICA (Türk & Heinzl 2001). Dieses Messgerät (Abb. 1) ist speziell für hochviskose und grobstrukturierte organische Suspensionen, die vorwiegend in der Landwirtschaft auftreten, konzipiert worden. Es kann sowohl nach dem Drehmoment als auch nach der Drehzahl gesteuert werden. Das Rotationsviskosimeter wird wechselseitig mit einem speziellen Ankerrührer zur Aufnahme von Rührkurven (Zeitabhängigkeit) und einem Messzylinder zur Messung von Fließkurven (Scherabhängigkeit der Viskosität) an derselben Probe betrieben. Der Ankerrührer wird eingesetzt, um Entmischungen beim Rühren weitgehend auszuschließen. Mit derselben Probenfüllung wird anschließend eine Fließkurve aufgenommen, nachdem der Ankerrührer durch einen Messzylinder mit gleichem Außendurchmesser ersetzt wurde. Auf diese Weise können Manipulationen der untersuchten Proben durch Umfüllen, Temperaturänderungen u. a. vermieden werden. Der Zylindermesskörper hat einen Messspalt von 8 mm, um bei grobdispersen Suspensionen Verstopfungen und Partikelzerkleinerungen weitgehend zu vermeiden. Wichtige Grundregeln der Viskosimetrie sind die Sicherung von laminaren Schichtenströmungen, Wandhaftung und Homogenität der Suspensionen. Wandgleiteffekte, Sedimentationen und turbulente Strömungseinflüsse müssen vermieden werden. Daher sind die scherenden Zylinderflächen von Messzylinder und Messbecher als Sägezahnprofil gestaltet, was bei Rotationsviskosimetern für landwirtschaftliche Suspensionen langjährig bewährt ist (Türk et al. 1987).

Mit Hilfe eines Rohrviskosimeters wurden ergänzend Förderversuche im Technikumsmaßstab durchgeführt, um die Rotationsviskosimeter-Messwerte hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Rohrströmung zu überprüfen.



Abb. 1: Rotationsviskosimeter zur Messung von Rühr- und Fließkurven landwirtschaftlicher Suspensionen

Um die Fütterungstechnologie (Aufbereitung und Verteilung) und die Futteraufnahmezeiten hinreichend zu berücksichtigen, wurde das Rührverhalten über 90 Minuten bei einer Rührerdrehzahl von 300 min^{-1} beobachtet. Während dieser Zeit verändert sich die Struktur des Flüssigfutters durch Quelleffekte (Wasseraufnahme) und durch die mechanische Belastung.

Die Messwerte für Drehmoment und Temperatur wurden stets im gleichen Zeitraster von 10 Sekunden gemittelt und gespeichert. Die Rührkurven M (t) wurden jeweils bei konstanter Temperatur von 20 °C aufgenommen.

In Anlehnung an Arbeiten von Türk & Heinzl (2001) wurden Futterproben mit und ohne Enzymzusatz einander gegenübergestellt. Nacheinander wurden auf diese Weise die Enzymwirkungen von Futtermischungen mit unterschiedlich angemischtem Futter-Wasser-Verhältnis untersucht.

Durch die stetige Zerkleinerung beim Rühren und die damit verbundene Wasseraufnahme verändert sich das Fließverhalten mit der Rührzeit. Die Änderung des Drehmoments mit der Zeit dM/dt ist der Viskositätsänderung direkt proportional, d. h.

$$\frac{dM}{dt} \sim \frac{d\eta}{dt} \qquad (1)$$

Die größenmäßige Einschätzung der Viskositätsänderung lässt sich mit Hilfe des Enzymwirkungsgrades entsprechend Gleichung (2) kennzeichnen. Die absoluten Rührkurven von Futtermischungen mit Enzymzusatz M_E (t) werden dabei mit der Nullprobe ohne Enzymzusatz M_0 (t) ins Verhältnis gesetzt:

$$\left(1 - \frac{M_E}{M_0}\right) \cdot 100\,\% = f\,(t; TS) \qquad (2)$$

Der zeitliche Verlauf kann auf diese Weise einfach gegenüber gestellt werden, weil das Zeitraster der Messwertaufnahme jeweils konstant ist.

Fließkurven sind Schubspannungs-Schergradient-Abhängigkeiten $\tau = f(\dot{\gamma})$. Das Verhältnis von Schubspannung zum Schergradienten

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (3)$$

ist die dynamische Viskosität. Diese ist bei reinviskosen Newtonschen Flüssigkeiten eine Stoffkonstante, die nur von der Temperatur abhängt. Die Fließkurve ist dann eine Gerade durch den Nullpunkt mit dem konstanten Anstieg η. Bei nicht-Newtonschen Medien ist das Verhältnis von Schubspannung τ und Schergradient $\dot{\gamma}$ nicht linear, d. h. die sogenannte scheinbare Viskosität η_S ($\dot{\gamma}$) ist vor allem vom Schergradienten abhängig.

Flüssigfuttermischungen sind Suspensionen aus organischen Feststoffen und Wasser. Sie haben generell ein nicht-Newtonsches Fließverhalten. Die Fließkurven sind degressiv gekrümmte Kurven durch den Nullpunkt oder eine Fließgrenze τ_0. Diese Fließkurven können mit Hilfe verschiedener Fließmodelle approximiert werden. Für landwirtschaftliche Suspensionen sind die sogenannten Potenzgesetze gebräuchlich und man unterscheidet zwischen:

- pseudoplastischem Verhalten mit Anwendung des Fließgesetzes von OSTWALD und DE WAELE

$$\tau = K\,\dot{\gamma}^{n} \qquad (4)$$

und

- nicht-linear plastischem Fließverhalten mit Anwendung des Fließgesetzes von HERSCHEL und BULKLEY

$$\tau = \tau_0 + K\,\dot{\gamma}^n \qquad (5)$$

Die Fließkennwerte dieser Modellansätze sind der Konsistenzkoeffizient *K*, der Fließexponent *n* (kennzeichnet den Grad des nicht-Newtonschen Verhaltens) und die Fließgrenze τ_0.

Die Bestimmung von absoluten Fließkurven, also die Ermittlung der Wertepaare Schubspannung und Schergradient $\tau = f(\dot{\gamma})$, ist eine Hauptaufgabe der Rheometrie. Es kommt darauf an, eine eindimensionale, das heißt laminare, stationäre und isotherme Scherströmung in einem anwendungsrelevanten Messbereich zu erzeugen. Rotationsviskosimeter werden dazu bevorzugt verwendet. Die Messflüssigkeit wird zwischen zwei koaxialen Zylindern geschert und durch die an den Zylinderflächen wirkenden Schubspannungen wird das bremsende Drehmoment gemessen. Mit der Winkelgeschwindigkeit Ω und dem Drehmoment M werden Schubspannung und Schergradient als Punkte der Fließkurve berechnet:

$$\tau(R_i) = \frac{M}{2\pi R_i^2 H} \qquad (6)$$

$$\dot{\gamma}_N(R_i) = \frac{2\Omega}{1-\beta} \qquad (7)$$

mit

$$\beta = \left(\frac{R_i}{R_a}\right)^2 \qquad (8)$$

Werden die Fließ- oder Viskositätskurven ohne und mit Enzymzusatz ins Verhältnis gesetzt, lässt sich die Enzymwirkung in Abhängigkeit von der Scherbelastung nach Gleichung (9) darstellen. Das ist möglich, weil der Schergradient $\dot{\gamma}$ stets mit gleicher Schrittweite verändert wurde.

$$\left(1 - \frac{\eta_E}{\eta_0}\right) \cdot 100\,\% = f(\dot{\gamma}; TS) \qquad (9)$$

Der Enzymwirkungsgrad (Enzymeffizienz) zeigt, wie stark sich die Viskosität bei Scherbeanspruchung vermindert.

Die Standardmessungen erfolgten stets nach gleicher Verfahrensweise. Die Rührkurven (Zeitabhängigkeit des Drehmoments bei konstanter Drehzahl) und die Fließkurven (Scherungsabhängigkeit) mit und ohne Enzymzusatz werden entsprechend der Gleichungen (2) und (9) in Beziehung gesetzt und ergeben die jeweiligen Wirkungsgrade bzw. die Effizienz des Enzympräparates (Abb. 2).

Die Rühr- und Fließkurvenmessungen wurden hauptsächlich mit Weizen- und Gerstenfuttermischungen durchgeführt. Dabei wurden stets gleiche Getreidechargen verwendet. Das Enzympräparat wurde in pulverförmiger Form (*Rovabio™ Excel AP*) in einer konstanten Dosierung von 50 mg pro kg Trockenfutter (50 ppm) bzw. bei einzelnen Vergleichsmessungen auch in flüssiger Form (*Rovabio™ Excel LC)* von 200 ml pro kg Trockenfutter zugegeben. Die Probenmasse des Flüssigfutters betrug in der Regel 336 g. Das Trockenfutter m_F wurde mit Wasser m_W im Massenverhältnis von $m_F : m_W = 1 : 1{,}5$ bis $1 : 3{,}0$ angemischt. Der Wasseranteil wurde in konstanten Stufen verändert, womit auch der TS-Gehalt der Futtermischung variierte. Durch Zugabe von 80 %iger Milchsäure wurde der pH-Wert im Bereich von 4,5 bis 6,2 verändert. Die Messtemperatur betrug 20 °C. Der TS-Gehalt wurde gravimetrisch ermittelt und der pH-Wert mit einer Glaselektrode gemessen.

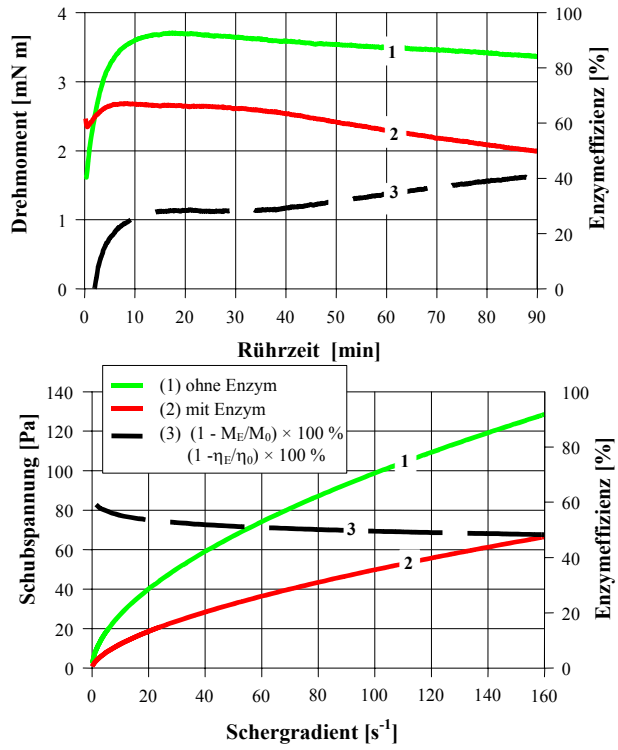


Abb. 2: Enzymwirkungen auf das Rühr- und Fließverhalten einer Weizenfuttermischung (Futter : Wasser = 1 : 2) bei 20 °C und pH = 5,3

3 Ergebnisse und Diskussion

Futterenzyme wirken effektiv nur bei bestimmten Konzentrationen und unter definiertem Milieu, d. h. pH-Wert, Temperatur und Reaktionszeit. Die beste

Enzymwirkung ergab sich für Weizen- und Gerstenfutter bei pH < 5,3 (7 ml Milchsäure/kg Wasser), wie Abb. 3 zu entnehmen ist. Dieser pH-Wert wurde daher bei der Variation des TS-Gehaltes stets konstant gehalten. Ohne Ansäuern würde bei Weizenfutter keine bemerkenswerte Enzymwirkung auftreten. Die Effekte sind bei den Gersten- und Weizenfuttermischungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei Gerstenfutter ist die Wirkung des Enzymkomplexes bei gleichem TS-Gehalt intensiver als bei Weizenfutter (Kurven 2 und 4 in Abb. 3).

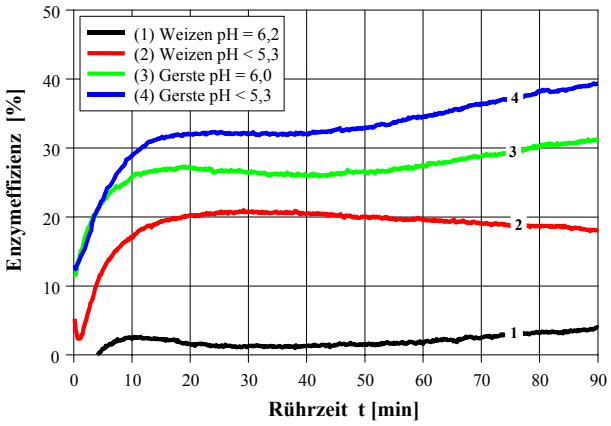


Abb. 3: Einfluss des pH-Wertes auf die Enzymwirkungen beim Rühren von Flüssigfutter aus Weizen und Gerste (Futter : Wasser = 1 : 2) bei 32 °C

Mit der Rührzeit wird die Enzymwirkung vermutlich in Folge zunehmender Durchmischung und Zerkleinerung von Futterteilchen etwas intensiver. Bei den Fließkurven zeigt sich dagegen eine Verminderung der Enzymwirkung mit steigendem Schergradienten von 60 auf etwa 40 %. Dies ist auf einen Rückgang der Reaktionszeiten mit zunehmendem Schergradienten zurückzuführen.

Die Enzymwirkungen der untersuchten Weizen- und Gerstenfuttermischungen nach 90 Minuten Rührzeit sind in Abb. 4 als Abhängigkeit vom TS-Gehalt dargestellt. Hier ist eine Differenzierung zwischen den Getreidearten nicht mehr erforderlich. Die Enzymwirkung (Kurve 3) verstärkt sich mit steigendem TS-Gehalt. Sie vermindert sich, wenn Sedimentation auftritt, das heißt, wenn freies Wasser vorhanden ist, und eine intensive Scherung der Futterpartikel nicht mehr erfolgt. Das ist für Futtermischungen mit TS < 26 % der Fall.

Eine ähnliche TS-Abhängigkeit des Enzymwirkungsgrades zeigt sich für das Fließverhalten, d. h. die Scheinviskositäten beim Schergradienten $\dot{\gamma} = 100\ s^{-1}$, in Abb. 5. Hier kann man für Futtermischungen mit TS > 28 % von konstant hohen Enzymwirkungen ausgehen, d. h. durch das Multi-Enzympräparat kann die Viskosität von Weizen- und Gerstenfuttermischungen um bis zu 40 % vermindert werden.

Wenn man von einer konstanten Viskosität ausgehen würde, könnte der TS-Gehalt durch die Enzymwirkung um etwa ΔTS = 2 % vermindert und eine dem entsprechende Wassermenge eingespart werden.

Die Unterschiede des Fließverhaltens von Flüssigfuttermischungen sind erheblich. Sorte, Erntezeitpunkt, Behandlung, Alter und andere Gründe führen bei gleicher Getreideart zu Viskositätsunterschieden von mehr als 50 %. Das betrifft auch die Wirkung von Futterenzymen. Abb. 6 zeigt vergleichend die Enzymeffizienz bei Futtermischungen gleicher Zusammensetzung aus Weizen (Kurven 1 und 2) und Gerste (Kurven 3 und 4). Hierbei treten Differenzen von > 20 % auf, die als zufällig anzusehen sind und erheblich größer als die sortentypischen Unterschiede sind. Geringere Enzymwirkungen wurden bei Soja und Triticale beobachtet.

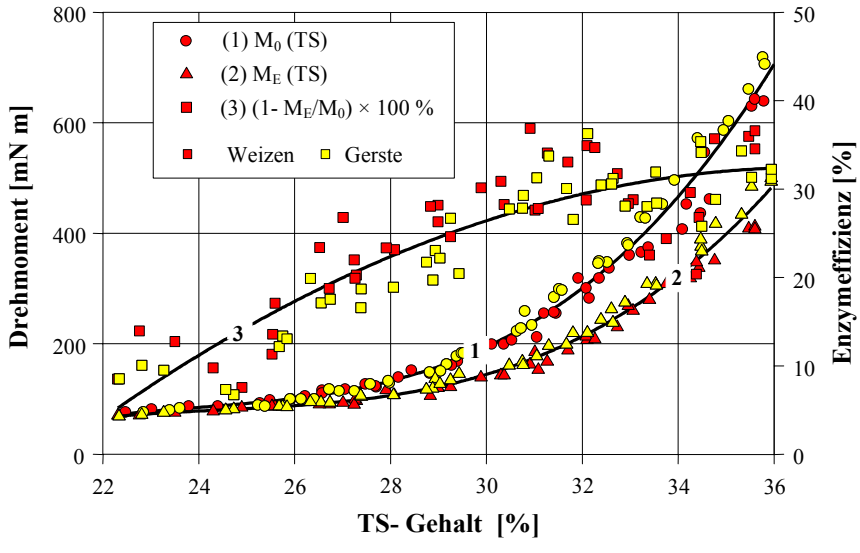


Abb. 4: Enzymwirkungen auf das Rührverhalten von Weizen- und Gerstenfuttermischungen bei 20 °C und pH < 5,3 nach 90 Minuten

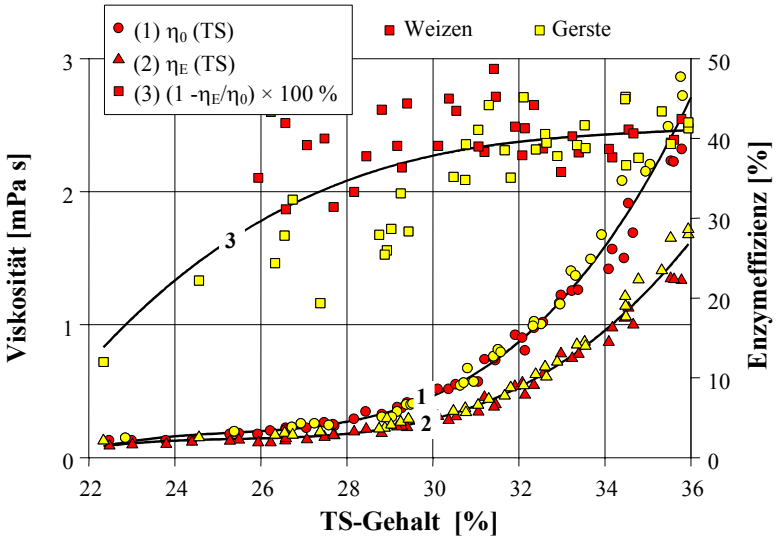


Abb. 5: Enzymwirkungen auf das Fließverhalten ($\dot{\gamma}$ = 100 s^{-1}) von Weizen- und Gerstenfuttermischungen bei 20 °C und pH < 5,3

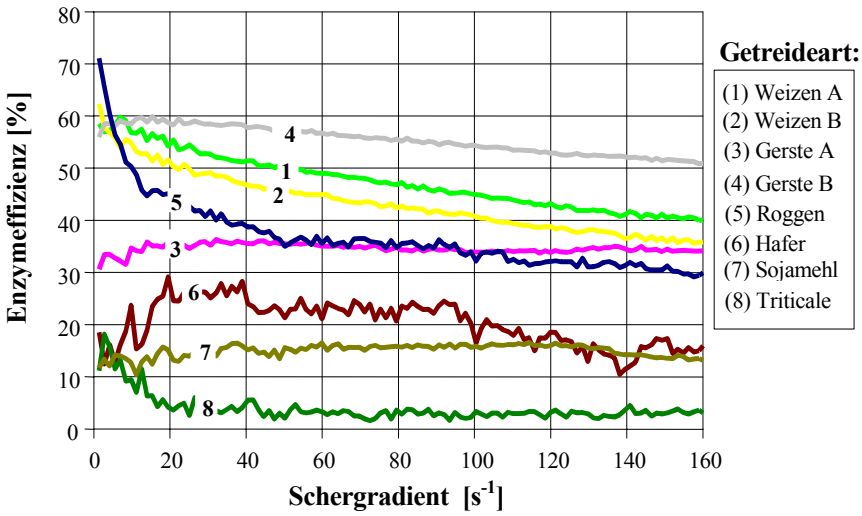


Abb. 6: Enzymwirkungen auf das Fließverhalten von Flüssigfutter (Futter : Wasser = 1 : 2) mit verschiedenen Getreidearten bei 20 °C und pH < 5,3

Parallelmessungen mit Rotations- und Rohrviskosimeter zeigten gute Übereinstimmungen. Die Wirkungseffizienz von Futterenzymen kann mit Hilfe von Rotationsviskosimeter-Messungen gut beurteilt werden. Planungsberechnungen und Pumpendimensionierungen sollten allerdings auf Grundlage der mit Hilfe des Rohrviskosimeters gemessenen Fließkennwerte erfolgen.

Zur Abschätzung von Energieeinsparungen durch Senkung der Viskosität von Flüssigfutter ist bei den technischen Prozessen (Mischen, Rohrströmung, Pumpenanwendung) grundsätzlich zwischen Laminar- und Turbulenzströmung zu unterscheiden. Im Vordergrund stehen bei den hochviskosen Flüssigfuttermischungen laminare Strömungen, das heißt der Viskosität kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu.

Beim Anmischen von Flüssigfutter treten anfangs turbulente, nach Zugabe von Getreideschrot laminare Strömungen auf, und man kann von einer direkten Proportionalität zwischen Viskositäts- und Energieminderung beim Rühren ausgehen. Die Rohrförderung von Flüssigfutter erfolgt vorwiegend bei Laminarströmung, d. h. die Viskosität ist sowohl dem Reibungsdruckverlust in der Rohrleitung als auch dem Energiebedarf der Pumpe direkt proportional. Die nach unterschiedlichen Wirkungsprinzipien arbeitenden Kreisel- und Drehkolbenpumpen sollten allerdings in Bezug auf ihre Energieeffizienz gezielt untersucht werden.

Eine präzise technologische Bewertung der Enzymwirkungen bei der Flüssigfütterung hinsichtlich der Energie- oder der Wasserverbrauchssenkungen erfordert weiterführende Untersuchungen zur Messung von Rohr-, Pumpen- und Mischerkennlinien.

4 Zusammenfassung

Die optimalen Wirkungsbedingungen eines NSP-spaltenden Enzymkomplexes wurden hinsichtlich der Haupteinflussgrößen anhand von Weizen- und Gerstenfuttermischungen mit Hilfe eines speziellen Rotationsviskosimeters untersucht. Der pH-Wert hat eine herausragende Bedeutung auf die Enzymwirkungen. Ein Ansäuern des Flüssigfutters auf pH < 5,3 ist unerlässlich. Die Enzymwirkung ist bei Flüssigfutter auf Gerstenbasis geringfügig stärker ausgeprägt als bei Weizenfutter. Die Viskosität lässt sich durch Enzymzusatz um maximal 40 % vermindern. Die Enzymwirkung nimmt mit steigendem TS-Gehalt zu und wird auch von der Rührzeit und dem Schergradienten beeinflusst.

Die untersuchten Wirkungen des Enzymkomplexes sind eine Ergänzung bekannter Fütterungs- und Verdauungsversuche. Bei den technischen Prozessen Mischen, Rohrströmung und Pumpeneinsatz ist eine Energieeinsparung oder ein geringerer Wassereinsatz proportional zur Viskositätssenkung möglich.

Literaturverzeichnis

Amad A.A. (2001): Zum Einfluss unterschiedlicher Behandlungsverfahren und Zusatzstoffe auf ernährungsphysiologische Parameter und Leistung wachsender Broiler nach Verabreichung weizenbetonter Futtermischungen. Georg-August-Universität Göttingen, Dissertation.

Anonymous (2003): Neue Strategien in der Futtermittelformulierung. Firmen-Mitteilung der Adisseo France SAS.

Christensen F.M. (1989): Enzyme Technology versus Engineering Technology in the Food Industry. Biotechnology and Applied Biochemistry 11, 249-265.

Harder A., Bouvy F.A.M. (1991): Enzymatic reduction of viscosity in liquid pig feed. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent 56 (4a), 1627-1635.

Hetland H., Choct M., Svihus B. (2004): Role of insoluble non-starch polysaccharides in poultry nutrition. World's Poultry Sciences Journal 60, 415-422.

Jakob S., Gotterbarm G., Roth F.X. (2003): Effect of Rovabio™ Excel AP on nutrient digestibility and on performance of weaning piglets. J. Anim. Sci. 80, Suppl. 1, 346, Abstract 1388.

Jakob S., Türk M., Zenke T. (2005a): Effect of a multi-enzyme preparation on rheological parameters of liquid feed for pigs. J. Anim. Sci. 83, Suppl. 1, 391, Abstract 695.

Jakob S., Wolinski J., Zabielski R., Laubitz D. (2005b): Effect of a multi-enzyme preparation on the morphology of weaning piglets. J. Anim. Sci. 83, Suppl. 1, 391, Abstract 694.

Schurz M. (2000): Einsatz reiner Xylanasen in der Fütterung von Schweinen und Geflügel. Lohmann-Information 1, 1-5.

Schuster S. (2003): In Vitro-Untersuchungen von zwei Enzympräparaten zur Eignung als Futterzusatzstoff. Humboldt-Universität zu Berlin, Diplomarbeit, 43 pp.

Senge B., Schwarzlos M., Blochwitz R., Annemüller G. (1996): Rheologische Untersuchung des Maischvorganges im Brauprozess. Applied Rheology 6, 12-20.

Türk M., Schmidt H., Dähre D. (1987): Rotationsviskosimeter für landwirtschaftliche fluide Fördermedien. Agrartechnik 37, 568-570.

Türk M. (1993): Rheologische Eigenschaften von Flüssigfutter. Bornimer Agrartechnische Berichte 3, 81-99.

Türk M., Heinzl W. (2001): Wirkung von α-Amylase auf das Fließverhalten von Flüssigfutter. Agrartechnische Forschung 7, 48-51.

Uhlig H. (1991): Enzyme arbeiten für uns. Technische Enzyme und ihre Anwendung. Carl Hanser Verlag, München und Wien, 436 pp.

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Dimension	Bezeichnung
H	m	Zylinderhöhe
K	Pa s^n	Konsistenzkoeffizient des Potenzgesetzes
M	m N m	Drehmoment
M_0	m N m	Drehmoment ohne Enzymzusatz
M_E	m N m	Drehmoment mit Enzymzusatz
m	kg	Massenanteile
n	-	Fließexponent des Potenzgesetzes
pH	-	pH-Wert (Ionenkonzentration)
R	m	Zylinderradius
t	s, min	Rührzeit
T	°C	Temperatur
TS	%	Trockensubstanzgehalt
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergradient, Schergeschwindigkeit
η	Pa s	Newtonsche dynamische Viskosität
η_0	Pa s	Viskosität ohne Enzymzusatz
η_E	Pa s	Viskosität mit Enzymzusatz
τ	Pa	Schubspannung
τ_0	Pa	Fließgrenze
Ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit