

Untersuchung des Fließverhaltens von Gülle unter dem Einfluss pulsierender Luft

Marco Riedel, Helmut Eichert

In der vorliegenden Arbeit ist der Einfluss von pulsierender Luft auf das Ausflussverhalten von Gülle untersucht worden. Dazu wurde ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut sowie ein geeignetes numerisches Strömungssimulationsmodell entwickelt. Unter Berücksichtigung des scherverdünnenden Fließverhaltens der Gülle ist ein Ersatzfluid am Prüfstand verwendet worden. Als Ergebnis der Untersuchungen ist ein geeigneter Druckbereich für die pulsierende Luft ermittelt worden. Als wesentliche Ergebnisse können der Mindest- und Höchstdruck der Luft benannt werden.

Schlüsselwörter

Gülle, 2-Phasen-Strömung, nichtnewtonsch

Sowohl im Ackerbau als auch in der Grünlandbewirtschaftung wird Gülle auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Dadurch entstehen enorme Belastungen der Luft durch die Emission von Ammoniak und Methangasen. Durch die Verschärfung der Düngeverordnung seit 2015 (DüV 2017), die u. a. die Verringerung der Ammoniakemission und Reduktion der Stickstoffverluste vorsieht, wird versucht, dem auf den Stand der Technik durch ein Verteilungssystem mit Schleppschläuchen zu begegnen. Dabei wird die Gülle zunächst zerkleinert und dann durch Schwerkrafteinfluss über abgehende Schläuche auf den Boden aufgebracht.

In Hanglagen und unebenem Gelände ergibt sich durch den Schwerkrafteinfluss häufig die Problematik einer ungleichmäßigen Ausbringung über die Arbeitsbreite. Weiterhin kommt es häufig zu Verstopfungen der Schläuche, was zu erhöhtem, bedienerunfreundlichem Wartungs- und Reinigungsaufwand führt.

Ziel des Projektes war es, einem Verstopfen von Schläuchen zur Gülleausbringung vorzubeugen. Dazu sollte der Gülleverteiler strömungsmechanisch optimiert werden und ein zusätzlicher Einsatz von pulsierender Luft erfolgen. Untersuchungen in diesem Zusammenhang sind mittels Strömungssimulationen und Versuchen am aufgebauten Prüfstand durchgeführt worden. Die pulsierende Luft verhindert die bisher auftretenden Unterbrechungen im Güllefluss und unterstützt ein stetiges Fließen der Gülle. Einem Verstopfen der Abgangsleitungen wird somit vorgebeugt. Die pulsierende Luft führt darüber hinaus zu einem verbesserten Fließverhalten der Gülle, was das Ausbringen der Gülle positiv beeinflusst. Somit wird ein Verstopfen bereits im Bereich des Verteilers bzw. Schneidwerks vermieden.

Charakterisierung des Fluids

Im Rahmen einer Literaturrecherche sind Fließeigenschaften in Abhängigkeit von Trockensubstratgehalt (TS-Gehalt), Temperatur und Tier verschiedener Güllearten ermittelt worden. Die Ergebnisse der Recherche sind in Tabelle 1 dargestellt. Die recherchierten Daten stammen aus den Jahren 1969

bis 2009. Insbesondere zwischen 1969 und 1986 hat sich die Genauigkeit der Messungen verbessert, weshalb aktuellere Werte aussagekräftiger eingeschätzt werden. Weiterhin zeigt sich, dass Schweinegülle einen niedrigeren Konsistenzfaktor sowie einen höheren Fließexponent gegenüber Rindergülle aufweist. Basierend auf diesen Daten wurde nach einem geeigneten Ersatzfluid für den Prüfstand gesucht. Für die Untersuchungen kamen Rinder- und Schweinegülle in Betracht, welche beide ein nicht-newtonsches Fließverhalten aufzeigen. Im Gegensatz zum newtonschen Fließverhalten sieht man hier keinen direkt proportionalen Zusammenhang zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit. Entsprechend des TS-Gehalts folgt das Fließverhalten dem Herschel-Bulkley-Potenzgesetz oder dem Ostwald-de-Waele-Potenzgesetz (Gleichung 1 und 2). Dabei ist τ die Schubspannung, τ_0 die Fließgrenze, k der Konsistenzfaktor, $\dot{\gamma}$ die Schergeschwindigkeit und n der Fließexponent. Nach Absprache mit dem Projektpartner wurde ein TS-Gehalt von 8 % zu Grunde gelegt. Nach HÖRNIG (1969) kann in diesem Fall mit Gleichung 2 gerechnet werden. Mittels des Quotienten aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit lässt sich die dynamische Viskosität μ des Fluids berechnen (Gleichung 3).

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Tabelle 1: Eigenschaften von Gülle und Ersatzfluiden (Flüssigseife und Wasser-Agar, eigene Messungen)

Fluid	TS-Gehalt in %	Konsistenzfaktor k in Pa s ⁿ	Fließexponent n
Schweinegülle bei 24,6 °C (HÖRNIG 1969)	8	0,299	0,438
Schweinegülle (ECKSTÄDT 1978)	9,49	0,4235	0,6943
Schweinegülle (HÖRNIG 1982)	8	0,893	0,439
Schweinegülle bei 20 °C (TÜRK 1986)	8	0,8707	0,5856
Schweinegülle bei 25 °C (LANGNER 2009)	5,09	0,1407	0,552
Schweinegülle bei 25 °C (LANGNER 2009)	12,9	3,9	0,5798
Rindergülle bei 19,7 °C (HÖRNIG 1969)	7,78	17,4	0,246
Rindergülle bei 19,7 °C (HÖRNIG 1969)	9,59	56,8	0,258
Rindergülle (HÖRNIG 1982)	8	7,096	0,286
Rindergülle bei 30 °C (EL-MASHAD et al. 2005)	9,1	21,3	0,211
Flüssigseife bei 20 °C	-	15,9	0,337
Wasser-Agar bei 20 °C	-	2,428	0,284

Ein Ersatzfluid für den Einsatz am Prüfstand sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Abbildung des Viskositätsbereichs von Rinder- und Schweinegülle entsprechend Tabelle 1
- Verfügbarkeit in der Menge 0,2 m³ bis 0,4 m³ unter 500 €
- Alterungsbeständigkeit bzw. kein Verfallen innerhalb von 3 Monaten
- Kein thixotropes Verhalten, d. h. zeitabhängiges Fließverhalten ist unerwünscht

Als Ersatzfluide kamen Flüssigseife und ein Gemisch aus Agar-Agar mit Wasser in Frage, die entsprechenden Parameter sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt. Agar-Agar (in Folge als Agar bezeichnet) wird aus den Zellwänden verschiedener Algenarten gewonnen und findet u. a. in der Lebensmittelindustrie Anwendung als Verdickungsmittel. Der leicht basische Charakter der Flüssigseife führt zu unerwünschten chemischen Reaktionen an metallischen Bauteilen des Prüfstandes und würde vorzeitigen Verschleiß am Prüfstand hervorrufen. Somit ist Flüssigseife aus der Auswahl ausgeschieden. Anschließend ist an einer geeigneten Mischung Agar mit Wasser geforscht worden. Als ideal hat sich dabei ein Verhältnis von 1,2-Masse-% Agar zu 98,8-Masse-% Wasser herausgestellt. Der Verlauf der dynamischen Viskosität über der Scherrate ist an einem Rotations-Viskosimeter ermittelt worden und ist in Abbildung 1 dargestellt.

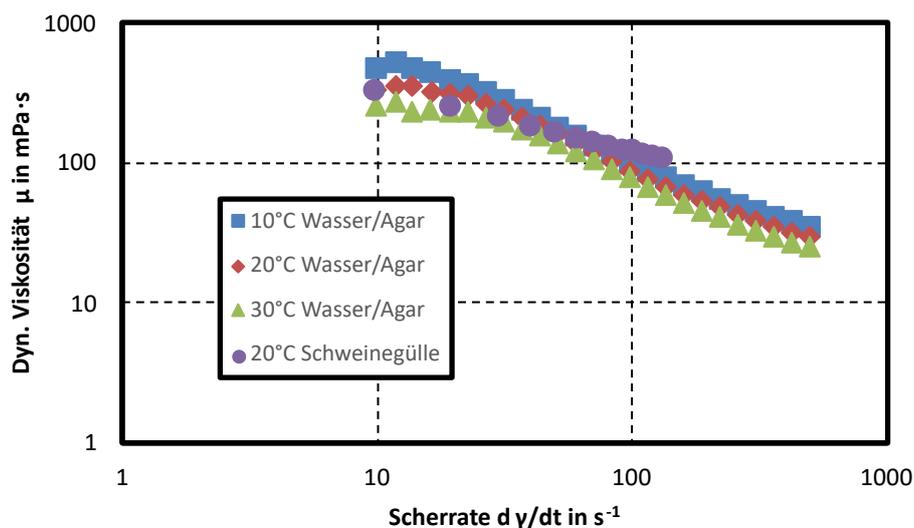


Abbildung 1: Dynamische Viskosität über Scherrate für ein Gemisch aus 1,2 % Agar und 98,8 % Wasser sowie im Vergleich Schweinegülle (Türk 1986)

Prüfstands Aufbau

Anhand eines experimentellen Aufbaus sollte der Einfluss der pulsierenden Luft auf das Fließverhalten des Testfluids untersucht werden. Dem Gülleverteiler werden zwei Stoffströme zugeführt. Zum einen die auszubringende Gülle, zum anderen unter Überdruck stehende Luft. Die Luft wird in einem vorgeschalteten Verdichter komprimiert und dem Rotor des Gülleverteilers zugeführt. Der Rotor dreht sich mit der konstanten Drehzahl n und überfährt damit zyklisch die Gülleausgänge des Gülleverteilers. Während der Rotor den Ausgang überfährt, wird dieser mit der komprimierten Luft beaufschlagt. Sobald der Rotor den Ausgang wieder freigibt, strömt Gülle durch den Ausgang. Das zyklische Ablaufen dieses Vorgangs sowie die Tatsache, dass der Rotor vier Abgänge für die kompri-

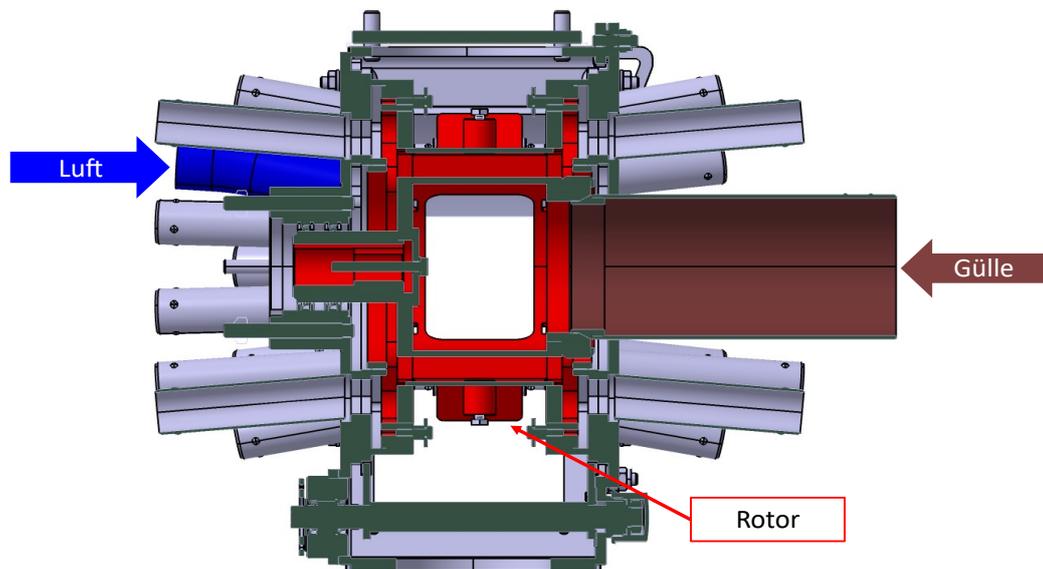


Abbildung 2: Schnittdarstellung des ausgeführten Gülleverteilers (© Riedel)

mierte Luft aufweist, führt zu einem Pulsieren der komprimierten Luft in den Ausgängen des Gülleverteilers. In Abbildung 2 ist der ausgeführte Gülleverteiler im Schnitt dargestellt.

Da der reale Gülleverteiler 32 Abgänge hat, war eine Vereinfachung des experimentellen Aufbaus nötig. Am realisierten Prüfstand weist eine Seite zwei Ausgänge auf, eine Eingangsöffnung befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite. Über die Eingangsöffnung wird das Ersatzfluid Agar-Wasser aus einem Vorratsvolumen mithilfe einer Tauchpumpe zugeführt. Der innenliegende Rotor ist so konzipiert, dass die Luftzufuhr auch aus einem herkömmlichen Werkstattdruckluftnetz möglich ist. Optisch zugänglich wird der Strömungsbereich mittels verschiedener Acrylglasanbauten. Der Prototyp für den Prüfstand sowie der Prüfstandsaufbau sind in Abbildung 3 und 4 dargestellt. In Abbildung 5 sind mehr Details zu dem am Prüfstand verwendeten Verteiler ersichtlich. Über den innen liegenden Rotor wird die von außen zugeführte Druckluft verteilt. Die Druckluft strömt im Rotor zu den Druckstücken. Ein Rückströmen von Flüssigkeit in den Luftteil wird mittels zweier Rückschlagventile innerhalb der Druckstücke verhindert. Die Abdichtung der Druckstücke erfolgt mittels jeweils eines Rechteckdichtrings, die axiale Anpresskraft erfolgt mithilfe von Spiralfedern.

In Tabelle 2 sind relevante Parameter des real ausgeführten Gülleverteilers denen des experimentellen Aufbaus gegenübergestellt. Bei den experimentellen Untersuchungen war das Ziel, die Strömungsverhältnisse im Austritt ähnlich denen des ausgeführten Verteilers abzubilden. Bedingt durch die unterschiedliche Anzahl der Austritte im Experiment gegenüber dem realen Verteiler sind die Verhältnisse am Einlass des Verteilers verschieden (ersichtlich in den unterschiedlichen Reynoldszahlen am Zufluss). Der Volumenstrom am Prüfstand ist mithilfe eines Bypasses eingestellt worden, Zielgröße war der Volumenstrom an der zweiten Austrittsöffnung. Zur messtechnischen Erfassung des Flüssigkeitsvolumenstroms kamen zwei Ultraschalldurchflusssensoren zur Anwendung. Die Reynoldszahl Re berechnet sich nach Gleichung 4, mit der Strömungsgeschwindigkeit u und dem Durchmesser d . Als Bezugstemperatur für die Eigenschaften der Referenzflüssigkeit (Dichte ρ und dynamische Viskosität μ) wird eine Temperatur von 20 °C zu Grunde gelegt. Nach HÖRNIG (1969, 1982) sowie ECKSTÄDT (1978) erfolgt die Berechnung der Reynoldszahl Re im Fall der nichtnewtonschen Gülleströmung nach Gleichung 5.

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$Re = \frac{u^{2-n} \cdot d^n \cdot \rho}{k} \quad (\text{Gl. 5})$$

Tabelle 2: Einstellparameter zur Untersuchung des Lufteinflusses

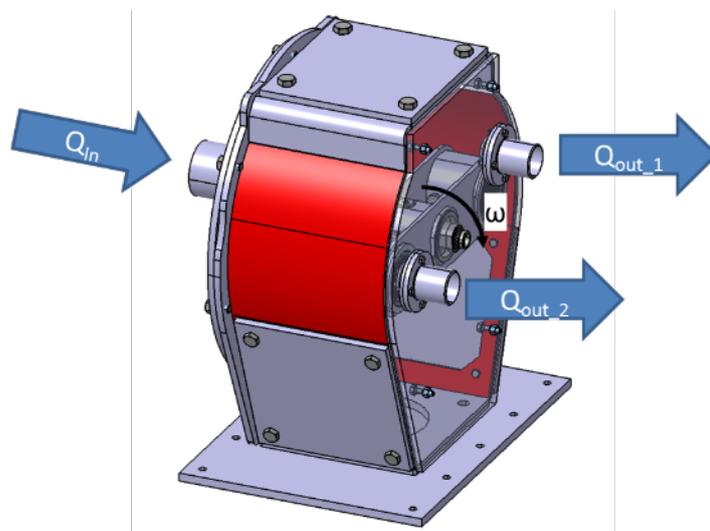
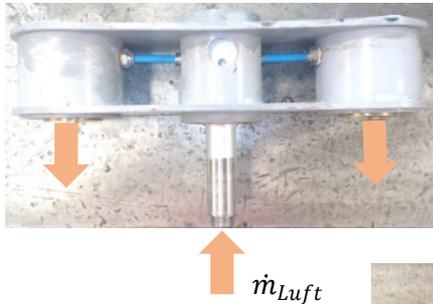


Abbildung 3: CAD-Darstellung des Prüfstandsverteilers, die Seitenwand auf der Auslassseite ist aus Darstellungsgründen transparent abgebildet (© Riedel)

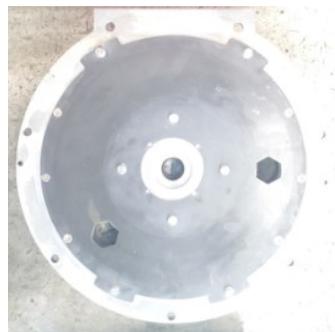


Abbildung 4: Prüfstands Aufbau (Rotor sowie Plexiglasscheiben noch demontiert) (© Riedel)

Rotor für den Verteiler mit
Hohlwelle für Luftzuführung



Druckstücke zur Abdichtung
des Verteilers gegenüber dem
Austritt (verbaut im Rotor)



Mit Gleitlack versehene
Gleitfläche der Druckstücke
(Austrittsseite des Verteilers)

Abbildung 5: Einzelne Bauteile des Prüfstandes (© Riedel)

Parameter	Ausgeführter Gülleverteiler	Experimenteller Aufbau
Durchmesser Zufluss d_1 in mm	115	60
Durchmesser Austritt d_2 in mm	34	36
Anzahl Austritte	32	2
Volumenstrom Q_1 Zufluss in L/min	1.884	140
Volumenstrom Q_2 Austritt in L/min	58,9	70
Referenzflüssigkeit	Schweinegülle, TS = 8 % (TÜRK 1986)	Wasser-Agar
Reynoldszahl Zufluss Re_1	1592	132
Reynoldszahl Austritt Gülle Re_2	182	202
Drehzahl Rotor bzw. Schneidwerk n in min^{-1}	300	300

Ergebnisse

Am Prüfstand erfolgte der Nachweis, dass mithilfe der Druckluft ein Freispülen der Austritte möglich ist. Wesentliche Fragestellungen in diesem Zusammenhang waren:

- Tritt ein Absondern der Luft im oberen Teil des Austrittsrohres auf
- Führt die Luft zur Schaumbildung

Zur Einordnung der Ergebnisse ist eine Sektion im zweiten Austrittsrohr einen Meter stromabwärts vom Verteiler betrachtet worden. Die Einstellparameter sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es ist jeweils eine Versuchsreihe mit Wasser und eine mit dem Wasser-Agar-Gemisch durchgeführt worden. In beiden Fällen ist eine Absonderung der Gasphase ab einem Überdruck von $p_{\text{Luft}} = 400$ mbar sichtbar (Abbildung 6 und 7). Die pulsierende Luft strömt im oberen Teil des Rohres. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass untere Bereiche mit Verstopfungen nicht von der Luft erfasst werden. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass keine Luft in Lösung geht, da in keinem Fall Schaumbildung

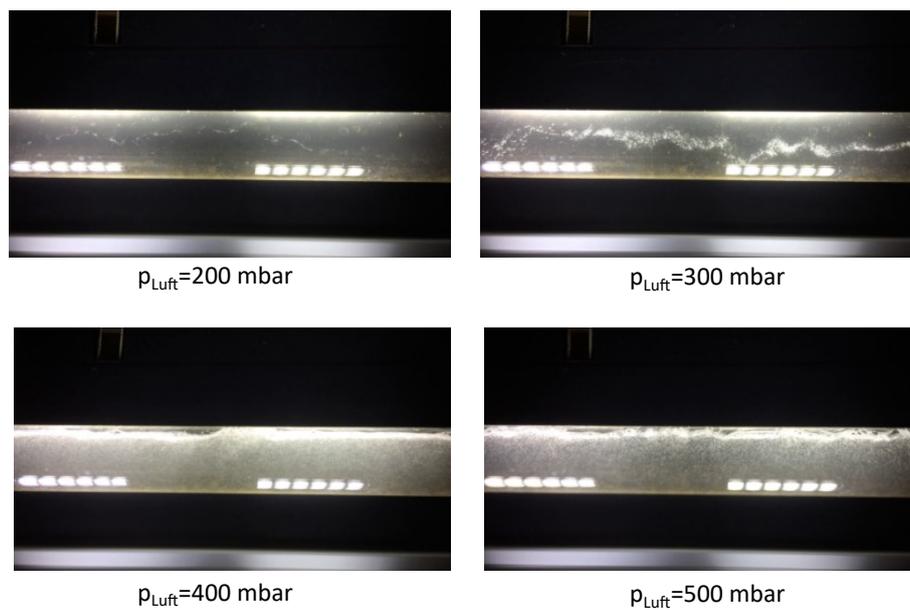


Abbildung 6: Einfluss pulsierender Luft auf Strömungsverhältnisse im Austritt (Wasser $Q=70$ L/min) (© Riedel)

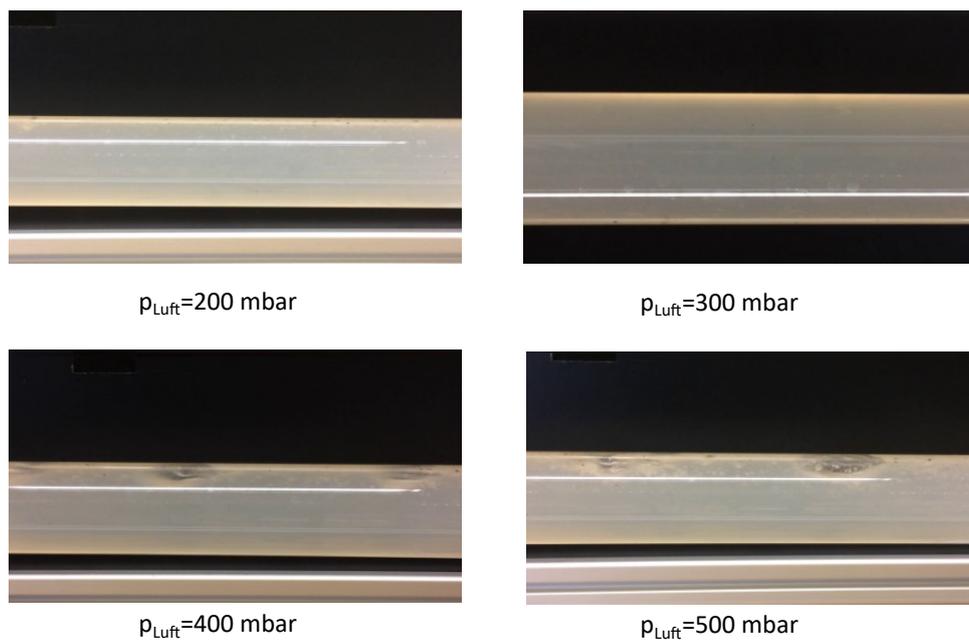


Abbildung 7: Einfluss pulsierender Luft auf Strömungsverhältnisse im Austritt (Wasser-Agar $Q=70$ L/min) (© Riedel)

ersichtlich war. Die Trennung der beiden Phasen Flüssigkeit und Gas ist deutlich sichtbar. Einzelne Luftblasen im Flüssigkeitsstrom ließen sich bei einem geringeren Überdruck der Luft beobachten. Dies ist bei einem Druckwert von kleiner 300 mbar der Fall. Hier ist davon auszugehen, dass die Luft Verstopfungen im Rohr miterfasst und dabei hilft diese zu lösen.

Tabelle 3: Einstellparameter zur Untersuchung des Lufteinflusses

Versuch Nr.	Volumenstrom Q_2 im Austritt in L/min	Drehzahl des Rotors min^{-1}	Überdruck der Druckluft mbar
1	70	300	200
2	70	300	300
3	70	300	400
4	70	300	500

Weiterhin sollte untersucht werden, wie viel Überdruck an Luft notwendig ist, um den geforderten Güllemassenstrom aufrecht zu erhalten. Bei jedem Überfahren des Rotors wird der Fluss am Austritt für kurze Zeit unterbrochen. Diese Unterbrechung bedingt einen Unterdruck im Austritt und führt in Folge zu einem reduzierten Güllemassenstrom. Mithilfe der zusätzlichen Druckluft soll dieser Effekt verhindert werden.

Die Untersuchungen sind mithilfe der dreidimensionalen numerischen Strömungsmechanik und der Software Star-CCM+ durchgeführt worden. Aus Gründen der Vereinfachung erfolgten die Berechnungen mit einem Ausschnitt aus dem Gesamtmodell des real ausgeführten Gülleverteilers, wobei ein Austritt Berücksichtigung fand (Abbildung 8). Zur Abbildung der Rotordrehung und damit auch der abwechselnden Beaufschlagung mit Gülle oder Luft ist eine zeitlich variierende Randbedingung am Einlass gewählt worden. Entsprechend der Drehzahl des Rotors und der Geometrie des Rotors wird am Einlassrand ein Güllemassenstrom oder ein Luftmassenstrom vorgegeben. In Abbildung 9 ist diese Variation der Einlassrandbedingung schematisch dargestellt.

Die für das numerische Modell relevanten Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der Luftmassenstrom ist so lange variiert worden, bis der geforderte Güllemassenstrom am Austritt erreicht wurde. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse dargestellt. Ab einem Luftvolumenstrom (Umrechnung mit der Luftdichte) von 86,4 L/min und einem Überdruck von 100 mbar wird der geforderte Güllemassenstrom erreicht.

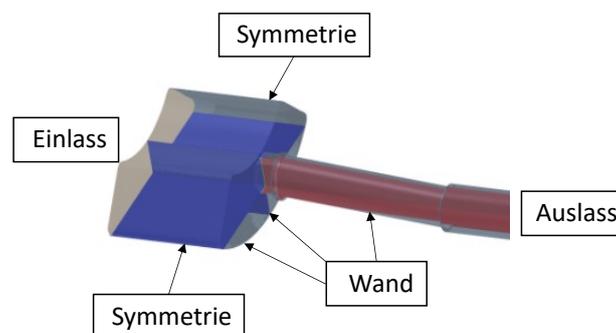


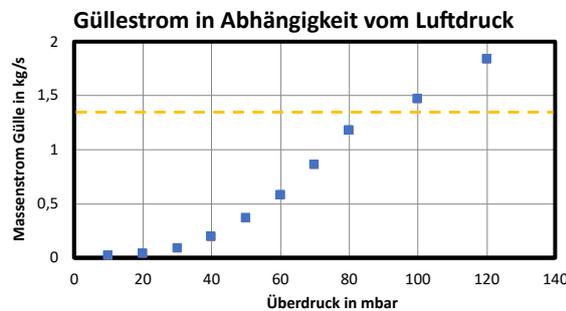
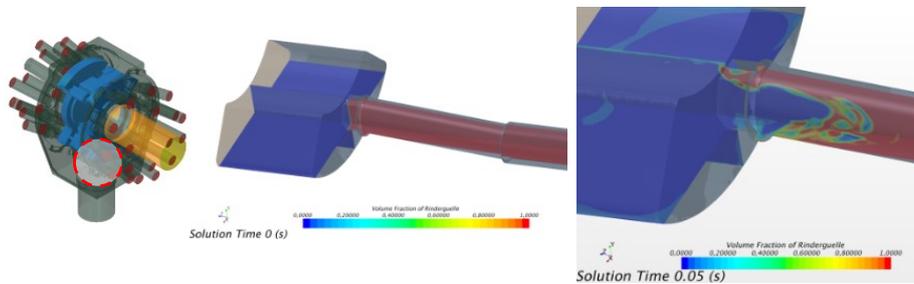
Abbildung 8: Randbedingungen am CFD-Modell (© Riedel)



Abbildung 9: Zyklische Einlassrandbedingung zur Abbildung der Rotordrehung (© Riedel)

Tabelle 4: Parameter des 3D-CFD Modells

Parameter	Wert bzw. Eigenschaft
Gittergröße	1,67 Mio. Zellen
Numerische Modelle	dreidimensional, nicht newtonsches Fließverhalten entspricht Gleichung 2 (Rindergülle, $\mu_{\max} = 10.000 \text{ Pa s}$), laminar, zweiphasig (Volume of Fluid Methode), instationär
Dauer der Berechnung	5 Rotorumdrehungen entsprechen $t = 1 \text{ s}$
Randbedingung am Auslass	Umgebungsdruck (100 kPa)
Randbedingung an der Wand	Haftbedingung ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$)
Randbedingung am Einlass	Gülle- bzw. Luftmassenstrom, variiert



Forderung von 1,36 kg/s je Austritt (10m³ Gülle sollen in 5,5 min mit 24 Austritten verteilt werden)

Abbildung 10: Mindestluftdruck bzw. Volumenstrom, um den geforderten Güllemassenstrom einzuhalten (© Riedel)

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit ist der Einfluss von pulsierender Luft auf das Ausflussverhalten von Gülle untersucht worden. Als Fluide kamen Wasser, Agar-Wasser sowie im Fall der Simulation Rindergülle zum Einsatz. Untersuchungen sind an einem Prüfstand und an einem Strömungssimulationsmodell durchgeführt worden. Als wesentliche Ergebnisse können der Mindest- und Höchstdruck der Luft benannt werden. So wird ab einem Überdruck der Luft von etwa 100 mbar der Güllemassenstrom aufrechterhalten. Steigt der Überdruck auf mehr als 300 mbar an, so wird eine Phasentrennung im Austrittsrohr beobachtet. Im Sinne des Freispülens des Austrittsrohrs sollte eine Phasentrennung vermieden werden. Entsprechend ist ein Überdruckbereich von 100 bis 300 mbar als ideal anzusehen.

Literatur

- DüV (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 32, S. 1305–1348
- Eckstädt, H. (1978): Beitrag zur Bemessung von Rohrleitungen für die Förderung von Gülle unter Berücksichtigung der Sedimentation. Dissertation, Universität Rostock
- El-Mashad, H.; van Loon, W.; Zeeman, G.; Bot, G. (2005): Rheological properties of dairy cattle manure. *Bioresour Technol.* 96(5), pp. 531–535
- Hörnig, G. (1969): Beitrag zur Bemessung von Beregnungsrohrleitungen beim Klärschlamm- und Gülletransport. Dissertation, Technische Universität Dresden
- Hörnig, G. (1982): Berechnung der Druckverluste beim Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Gölledruckrohrleitungen. *Agrartechnik* 32, S. 25
- Langner, J.M. (2009): Investigation of non-newtonian flow in anaerobic digesters. Masterthesis, University of Manitoba. https://search.lib.umanitoba.ca/permalink/01UMB_INST/1p55dqn/alma99149352779001651, Zugriff am 10.7.2020
- Türk, M. (1986): Das Fließverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle. *Agrartechnik* 36, S. 31–33

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichert, Professur Technische Thermodynamik an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik, Westsächsische Hochschule Zwickau, Scheffelstraße 39, 08066 Zwickau, E-Mail: helmut.eichert@fh-zwickau.de

Marco Riedel, Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik, Westsächsische Hochschule Zwickau, Scheffelstraße 39, 08066 Zwickau, E-Mail: marco.riedel@fh-zwickau.de

Danksagungen

Diese Arbeit ist im Rahmen der Fördermaßnahme „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) vom BMWi entstanden, wofür wir uns ausdrücklich bedanken möchten. Ebenso möchten wir uns bei unseren beiden Projektpartnern Eidam Landtechnik und der Forschungsgemeinschaft Mitteldeutschland (FGMD) bedanken.