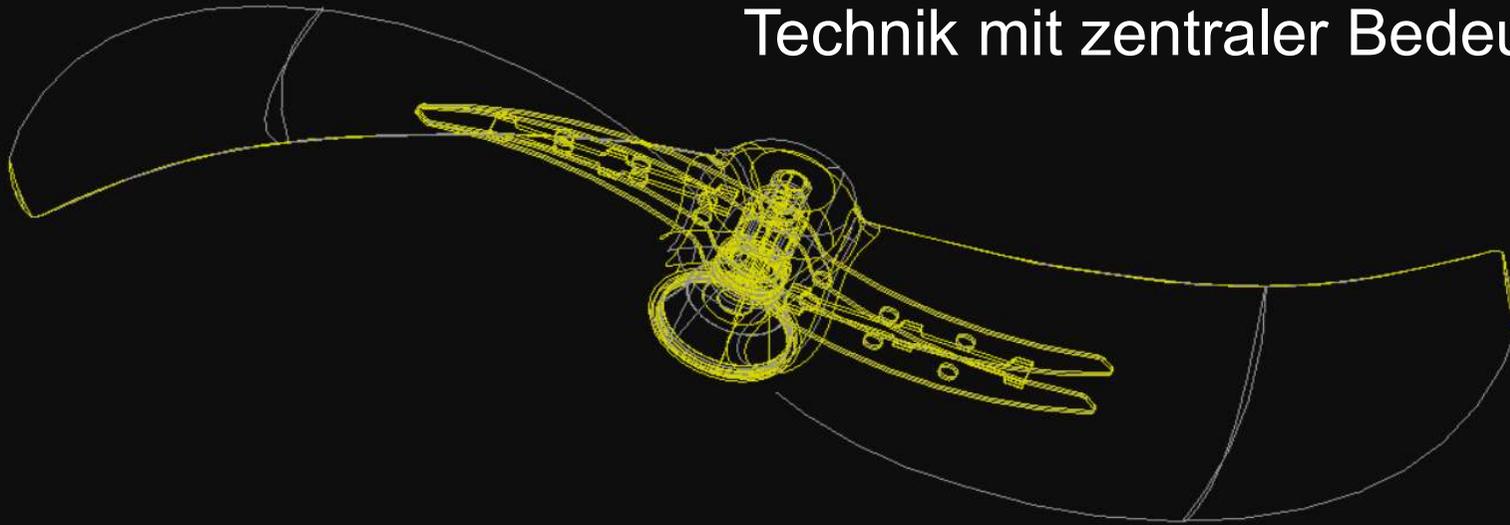




## Rührtechnik in Biogasanlagen - Technik mit zentraler Bedeutung



- Grundlagen der Strömungserzeugung
- Einfluss des Fließverhaltens
- Kavernenbildung
- Einfluss des Zerkleinerungsgrades
- Korrespondenzverhalten
- Optimierung der Rührtechnik
- Zusammenfassung



## Tragflügeltheorie / Wie funktioniert ein Propellerrührwerk?

- durch das Propellerflügelprofil entsteht eine Differenzgeschwindigkeit
- Ausbildung einer Saug- und einer Druckseite
- Druckunterschied führt zu einem Auftrieb
- schräg gerichtete Auftriebskräfte der einzelnen Flügel überlagern ihre Axialkomponenten zu einer resultierenden Kraft = Axialschub

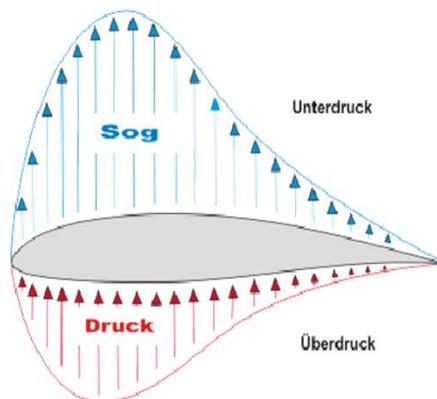


Abb.: Tragflügel, Quelle: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

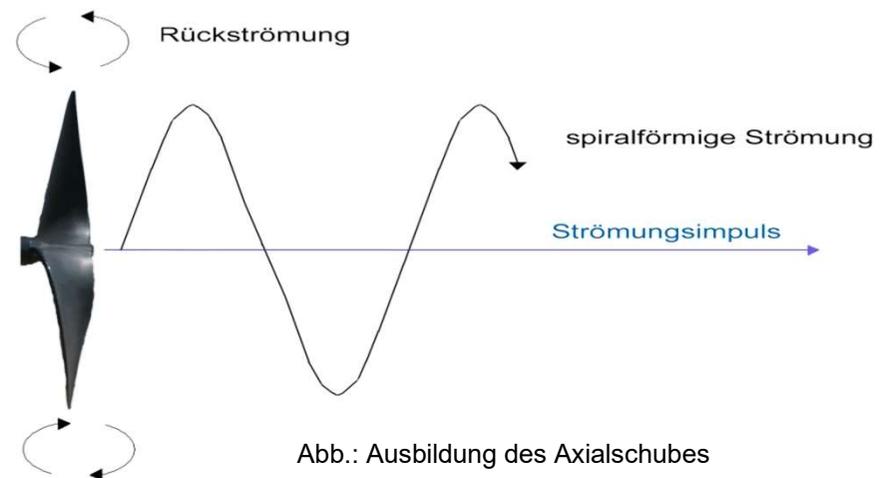


Abb.: Ausbildung des Axialschubes

### Allgemeine Beckenströmung in wässrigen Suspensionen

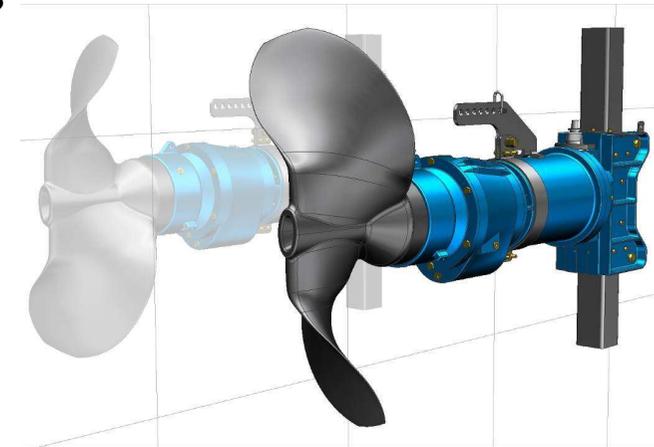
- Medium wird durch einen den Propeller umhüllenden Strahl in axialer Richtung mit einer bestimmten Kraft beschleunigt
- zur Erfüllung aller Rühraufgaben ist es notwendig, eine bestimmte örtliche Geschwindigkeit / Geschwindigkeitsänderung zu induzieren
- die dazu zu installierende Kraft muss entsprechend den Druckverlust über den Fließweg ausgleichen

$$\text{Druckverlust: } \Delta p = \left( \frac{\lambda \cdot L}{D_h} + \sum_i \zeta_i \right) \cdot \rho \cdot \frac{v_B^2}{2}$$

- das Rührwerk kompensiert die Summe aller Widerstände bei einer bestimmten Geschwindigkeit durch Schubeintrag
- Widerstände sind z.B. Umlenkverluste, Einbauten, innere Reibung,  $F_{\text{Rührwerk}} = -F_W$  Wandreibung etc.

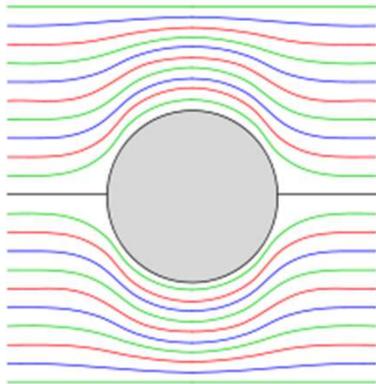
## Rühaufgaben in Biogasanlagen?

- Grundsätzliche Arten zu Rühren:
  - Strömungsbeschleunigung
  - Turbulenzerzeugung
  
- Schwimmschichten => Turbulenz
- Sinkschichten => Strömungsbeschleunigung
- Homogenisierung => Strömungsbeschleunigung
- Scherratentransport => Strömungsbeschleunigung

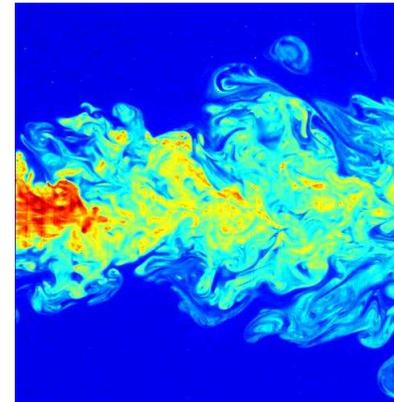


## Allgemeine Beckenströmung

- Grundlage effizienter und effektiver Strömungserzeugung ist damit:
  - Erzeugung einer mittleren Geschwindigkeit
  - sinnvolles Verhältnis zwischen Turbulenz und Strömungsbeschleunigung
- Ziel: bei minimalem Energieverbrauch



Laminare Strömung  
Quelle: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)



turbulente Strömung  
Quelle: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

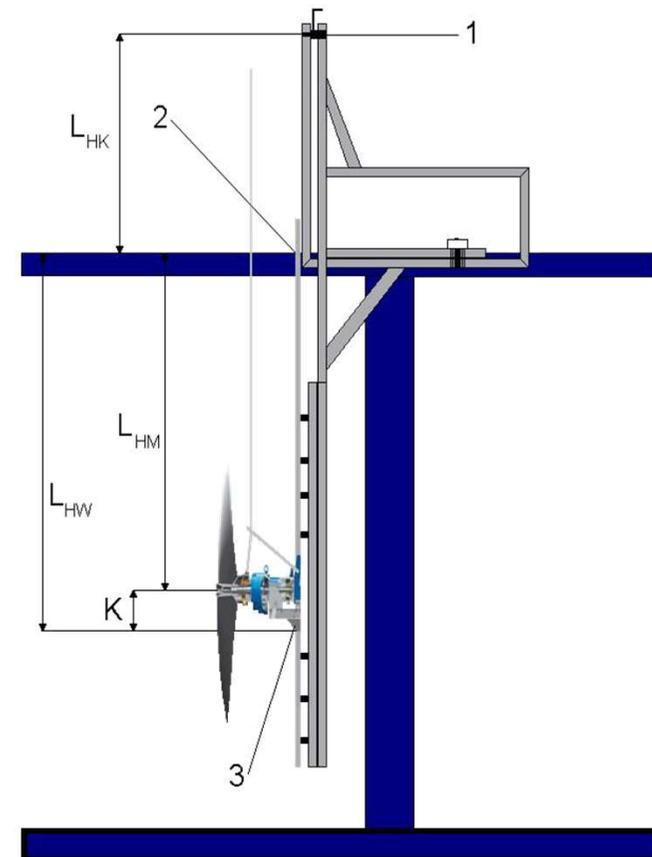
### Wie kann die Effizienz von RW verglichen werden?

- Rührwerk besteht grundsätzlich aus **Hydraulik** und **Antrieb**
- entscheidend für das Rührergebnis ist die hydraulisch wirksame Leistung, nicht die Motorleistung (Beispiel: Rührwerk ohne Propeller)
- Vergleich mit Förderhöhe und Fördermenge einer Pumpe
- hydraulisch wirksame Leistung = Axialschub
- Rührergebnis ist direkt proportional zur Schubkraft (Volumenstrom)
- wird für ein bestimmtes Rührergebnis ein bestimmter Schub benötigt, so ist dieser herstellerunabhängig
- Schub ist eine messbare Größe

### Wie kann die Effizienz von RW verglichen werden?

- **Gleiches Rührergebnis = gleiche hydraulisch wirksame Leistung über gleiche Zeiträume**
- Beurteilung erfolgt, indem die im Medium wirksame **hydraulische** Leistung ins Verhältnis zu der dafür aufzuwendenden Energie des **Antriebes** gesetzt wird
- **gilt nur für eine „globale“ Strömungserzeugung**
- **Effizienz = Axialschub / aufgenommene Leistung im Betriebspunkt (P1)**
- **Axialschub ist eine messbare Größe**

- **Ermittlung nach ISO 21630 „Pumps Testing Submersible mixers for wastewater and similar applications“**
- Prinzip: Spannungsmessung an einer Kraftmessdose
- Berechnung des Schubes über die Hebelgesetze



## Randbedingungen

- Gärsubstrate weisen ein ausgeprägt strukturviskoses Fließverhalten auf

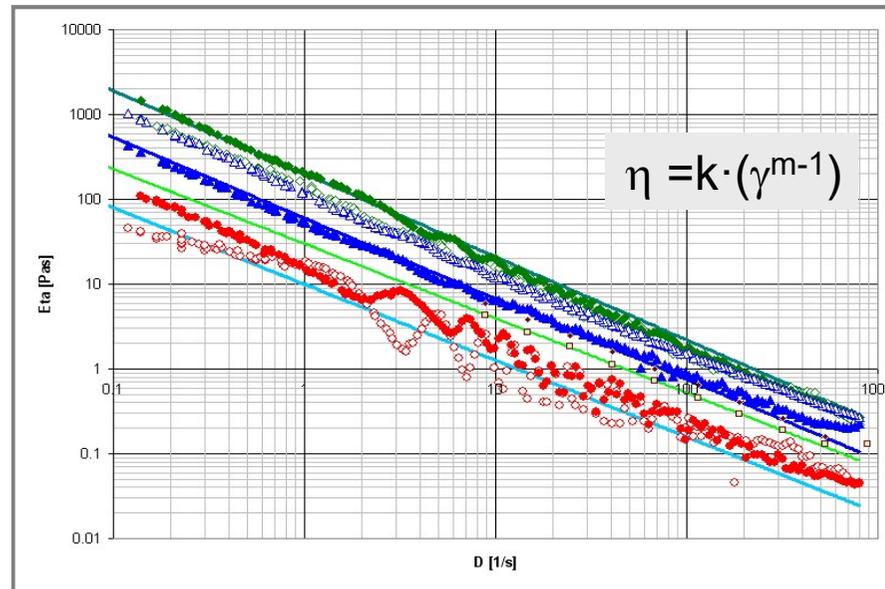


Abb.: Rheogramm von typischen Gärsubstraten

- Dies führt in der Praxis in Abhängigkeit vom Fließverhalten zu einer Kavernenbildung = häufig ungenügendes Rührergebnis

## Kavernenbildung

- bei zunehmender Zähigkeit kommt es zum Aufdicken der Grenzschicht entlang der Rührwerksschaufeln
- dadurch wird der Förderstrom verstärkt in radialer Richtung beschleunigt
- zunehmend wird der Freistrahel in eine schräg nach außen fördernde Ringströmung deformiert
- die Strömung am Austritt kehrt sich um
- der Propeller saugt am Eintritt und am Austritt Flüssigkeit an

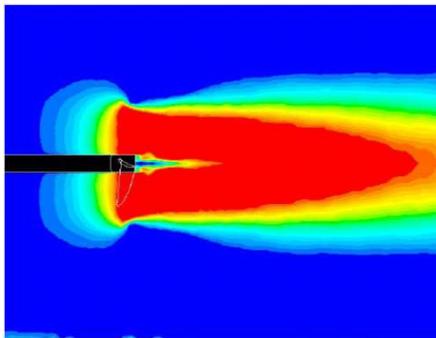


Abb.: Förderstrahlausbildung in Wasser

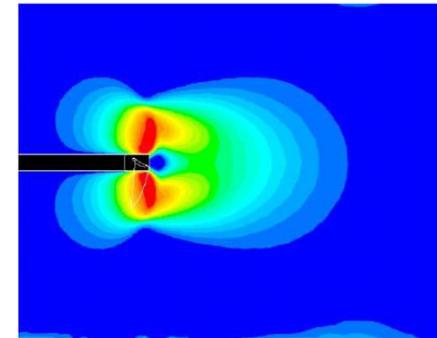


Abb.: Förderstrahlausbildung in Gärsubstrat

## Kavernenbildung bei unkritischen Fließverhalten

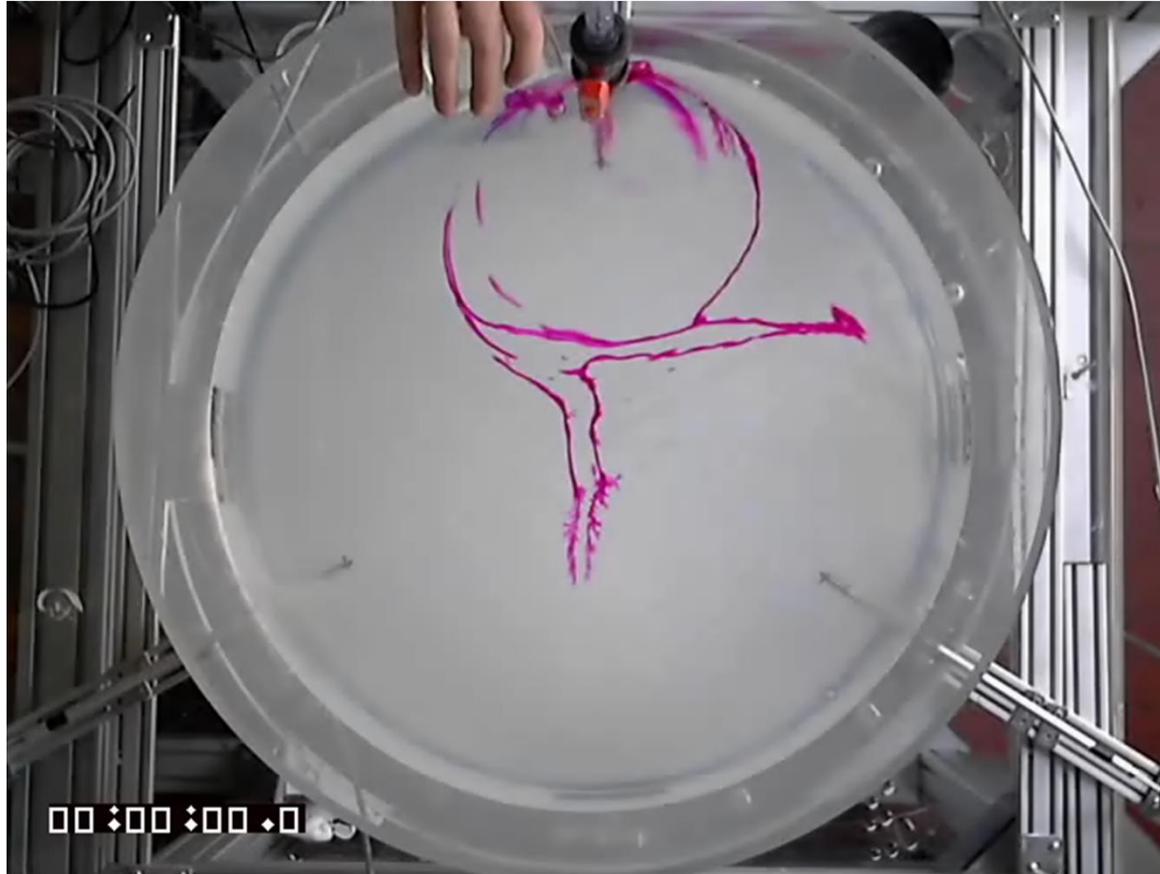


Abb.: Förderstrahlausbildung in Schlamm

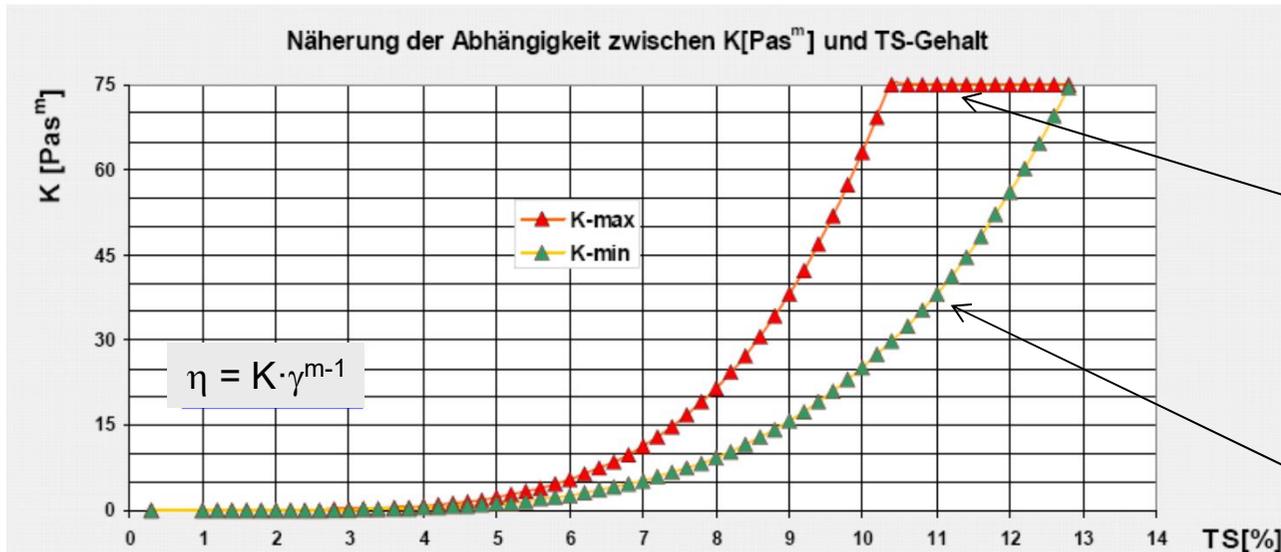


Abb.: Förderstrahlusbildung in Gärsubstrat

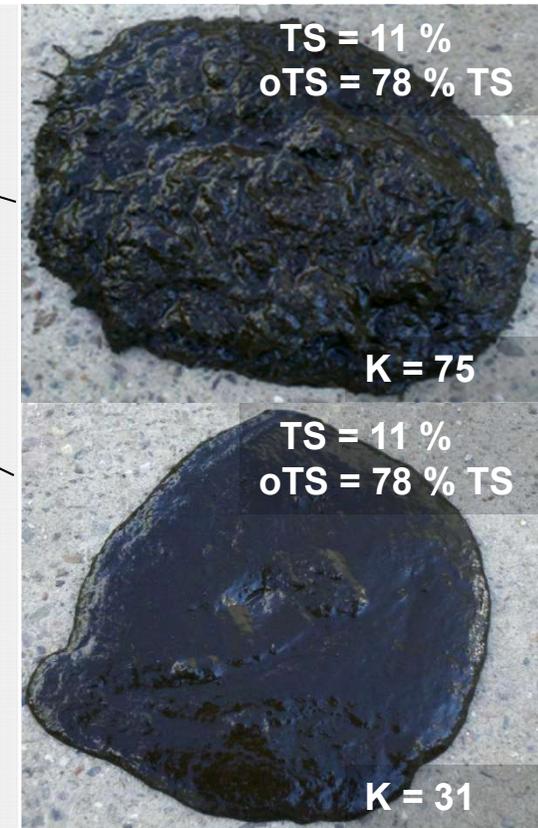
Näherung zwischen Konsistenz und Trockensubstanzgehalt

Grundsätzlich lässt die Ermittlung des Trockensubstanzgehalts keine Rückschlüsse auf das Fließverhalten zu (Auswertung von 210 Anlagen).

BGA Hermannshof 10-2012



Näherung für die Verbindung von K-Wert und Trockensubstanz-Gehalt  
K-Max - Wert sollte Basis für Auslegung sein



- grundsätzlich ändert sich das Fließverhalten über die Lebensdauer einer Biogasanlage signifikant auch bei gleichen Substraten

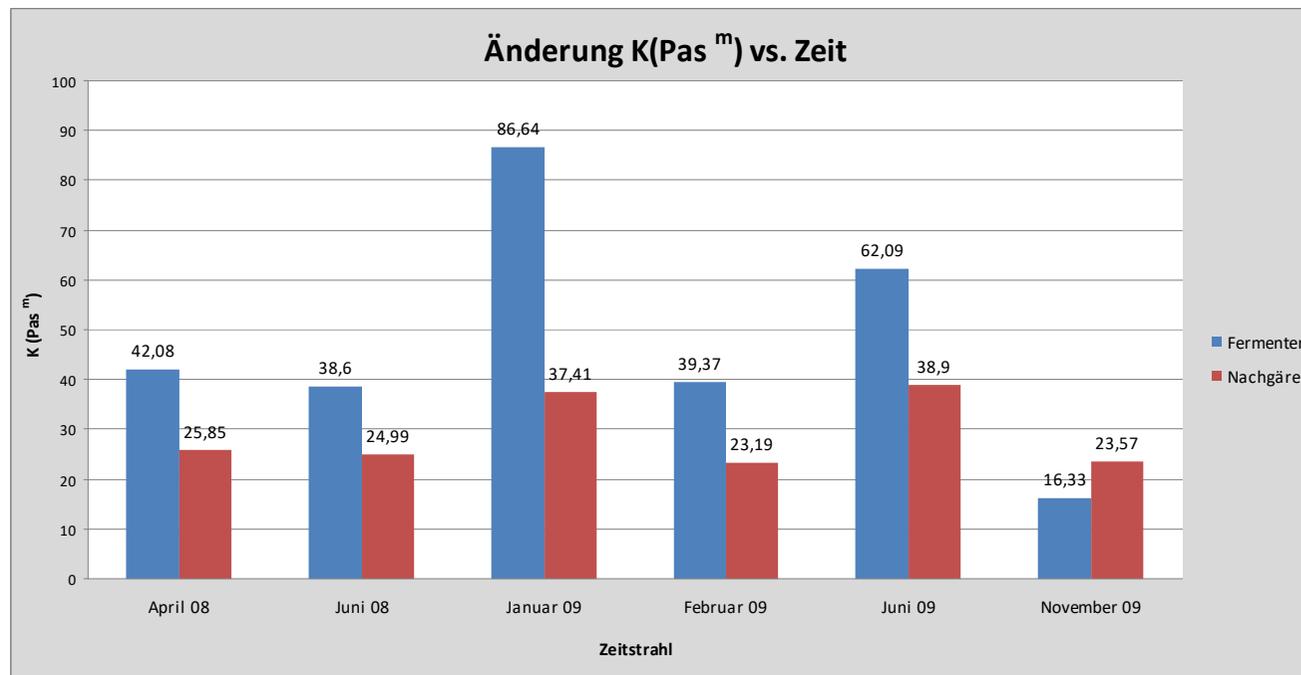


Abb.: Änderung K-Wert über die Zeit

## Einfluss Substratvorbehandlung

- **Zwei Fermenter je 1.045 m<sup>3</sup> Nutzvolumen;** Füllhöhe 5,2 m
  - Rührwerk 1 – Tauchmotorrührwerk
    - Volllastbetrieb; Abstand vom Reaktorboden 2,5 m
  - Rührwerk 2 – Langachsührwerk;
    - Teillastbetrieb 60 %; Abstand vom Reaktorboden 3,5 m
- **Fermenter 1**
  - Grassilage, Getreideschrot, Maissilage
  - Ohne Substratvorbehandlung
- **Fermenter 2**
  - Grassilage, Getreideschrot, Pferdemist, Gülle
  - Einsatz Querstromzerspaner

Quelle: Jobst, Karin, „Optimaler Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen“, KTBL/FNR-Kongress, Potsdam, 22/23.09.2015



Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof  
Quelle: Universität Hohenheim



Zerkleinerung Pferdemist  
OECHSNER, H.; MÖNCH-TEGEDER, M.; Workshop Energetische Biomassenutzung, Leipzig, 01./02.10.2014.

## Einfluss Substratvorbehandlung

- Geschwindigkeitsmessungen im Abströmbereich Rührwerk 1
- Einsatz Substratvorbehandlung

Reduzierung der Maximalen Faserlänge um circa 33 %

Reduzierung der Viskosität bis zu 60 %

Positive Beeinflussung der Fermenterdurchmischung

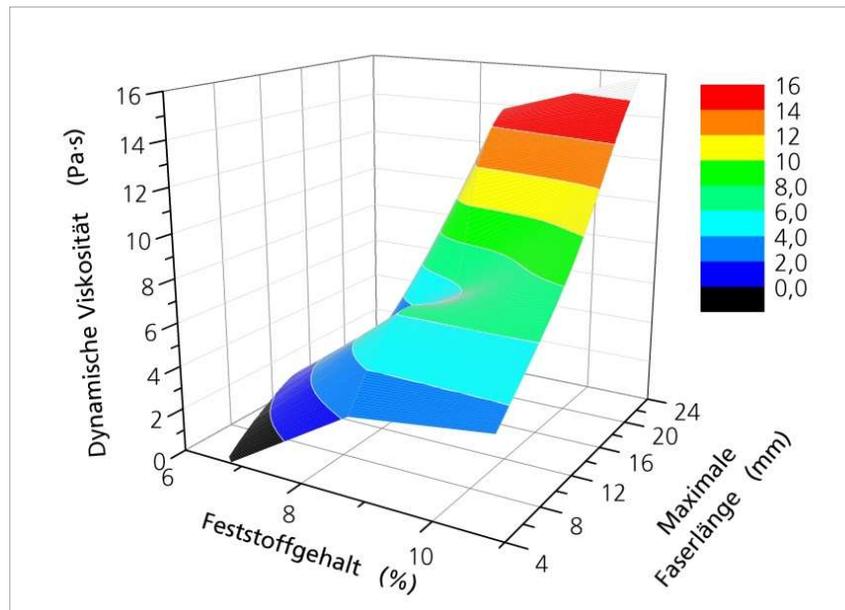
	Ohne Vorbehandlung	Mit Vorbehandlung
Feststoffgehalt	10,1 %	11,1 %
Maximale Faserlänge	38,5 mm	26,1 mm
Fließverhalten bei 40 °C	$K = 91,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m;$ $m = 0,11$	$K = 24,6 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m;$ $m = 0,31$
Viskosität bei 10 s <sup>-1</sup>	11,7 Pa·s	5,0 Pa·s
Strömungsgeschwindigkeit	1 – 3 cm·s <sup>-1</sup>	3 – 13 cm·s <sup>-1</sup>

Quelle: Jobst, Karin, „Optimaler Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen“, KTBL/FNR-Kongress, Potsdam, 22/23.09.2015

## Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf das Fließverhalten

### Einfluss Feststoffgehalt und granulometrischer Zustand

- Schergeschwindigkeit  $10 \text{ s}^{-1}$
- Temperatur  $40 \text{ °C}$



- direkte Beeinflussung des Fließverhaltens durch den granulometrischen Zustand
- der Einfluss der Faserlänge ist bedeutend größer als der TS - Gehalt des Mediums
- in Versuchen konnte bewiesen werden, dass eine Erhöhung der Faserlänge um circa 12 mm bereits eine Steigerung der Viskosität um 134 % bewirkte

Quelle: Jobst, Karin, „Optimaler Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen“, KTBL/FNR-Kongress, Potsdam, 22/23.09.2015

## Korrespondenzverhalten

### Korrespondenzverfahren

- jedes Rührwerk erzeugt in Abhängigkeit von den hydraulischen Eigenschaften und den rheologischen Randbedingungen eine Kaverne
- je kleiner die Drehzahl, umso geringer sind die Austrittsgeschwindigkeit und der Schub
- Ziel ist der Aufbau einer Beckengrundströmung
- Positionierung und Fließverhalten spielen eine wesentliche Rolle
- Eindringtiefe =  $f(\text{Fließverhalten})$  limitiert die Einsetzbarkeit der Hydraulik

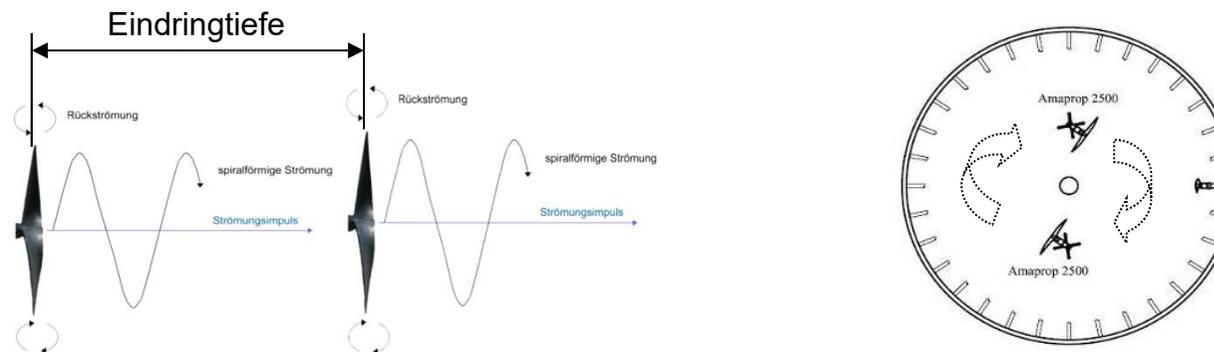
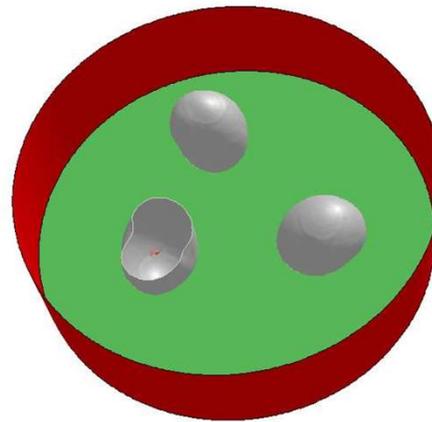


Abb.: Korrespondenzverfahren

## Korrespondenzverfahren



#f (Time=5.0000e-01) Oct 26, 2009  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rngke, unsteady)

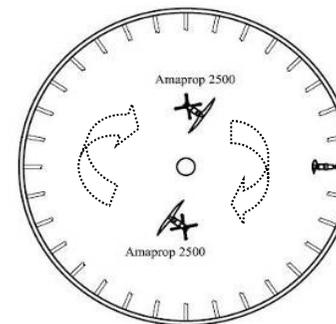
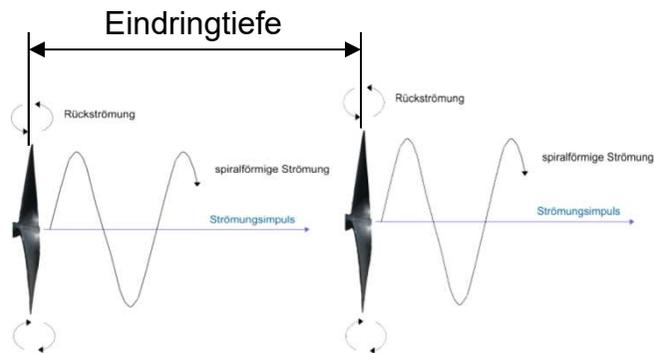
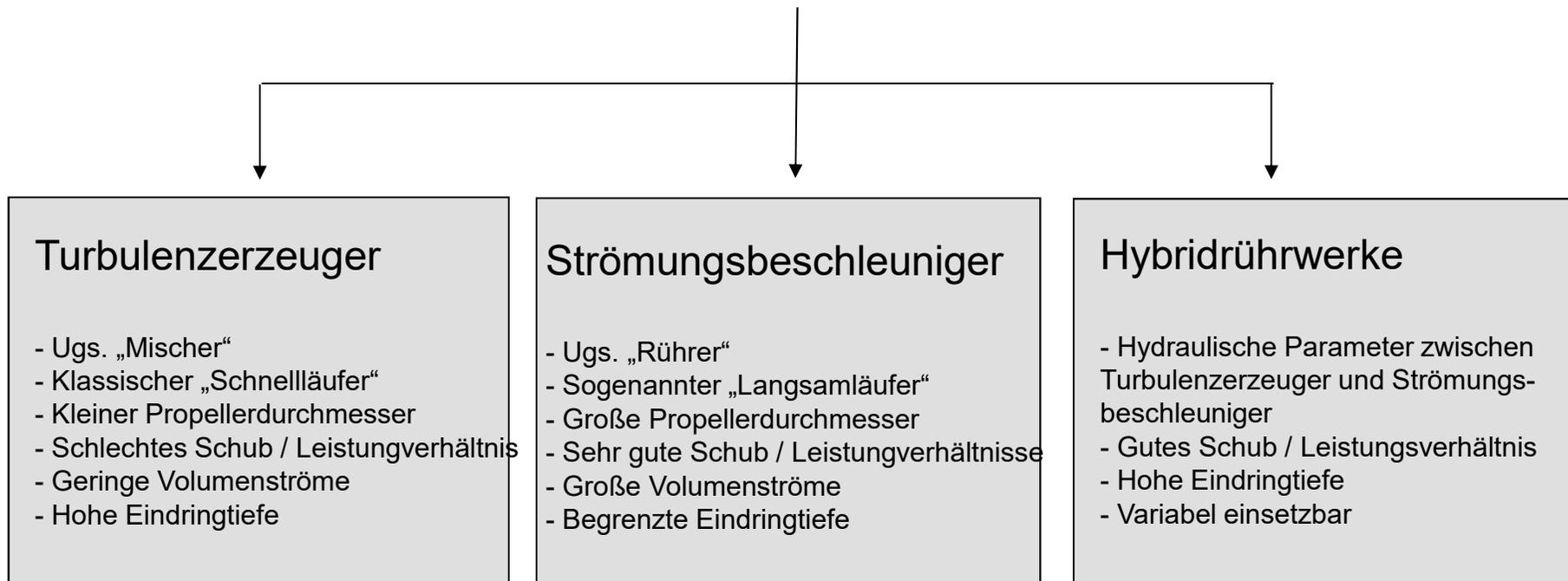


Abb.: Korrespondenzverfahren

### Rührwerkstypen



#### Turbulenzerzeuger

- Ugs. „Mischer“
- Klassischer „Schnellläufer“
- Kleiner Propellerdurchmesser
- Schlechtes Schub / Leistungsverhältnis
- Geringe Volumenströme
- Hohe Eindringtiefe



Abb.: Turbulenzerzeuger „Amamix“

#### Strömungsbeschleuniger

- Ugs. „Rührer“
- Sogenannter „Langsamläufer“
- Große Propellerdurchmesser
- Sehr gute Schub / Leistungsverhältnisse
- Große Volumenströme
- Begrenzte Eindringtiefe



Abb.: Strömungsbeschleuniger „Amaprop 2500“

#### Hybridrührwerke

- Hydraulische Parameter zwischen Turbulenzerzeuger und Strömungsbeschleuniger
- Gutes Schub / Leistungsverhältnis
- Hohe Eindringtiefe
- Variabel einsetzbar



Abb.: Hybridrührwerk „Amaprop 1000“

## Rührprobleme:

- Rührproblematik aus mangelnder Verfügbarkeit
  - Geschwindigkeit
  - Leistungsaufnahme
  - Temperaturproblematik
  
- Rührproblematik aus mangelndem Rührergebnis
  - Schwimmdecken
  - Korrespondenzverhalten
  - Sedimentationen



### Rührprobleme aus zu hoher Geschwindigkeit :

- Auslegung kompensiert alle Verluste über den Fließweg bei bestimmter Geschwindigkeit und Fließverhalten
- Fließverhalten zu wässrig => zu hohe Geschwindigkeiten bis 1,2m/s
- massive Schäden durch Querkräfte



Ausgeschlagenes Bodenlager



Abgestürztes Rührwerk

Rührprobleme aus zu hoher Geschwindigkeit :

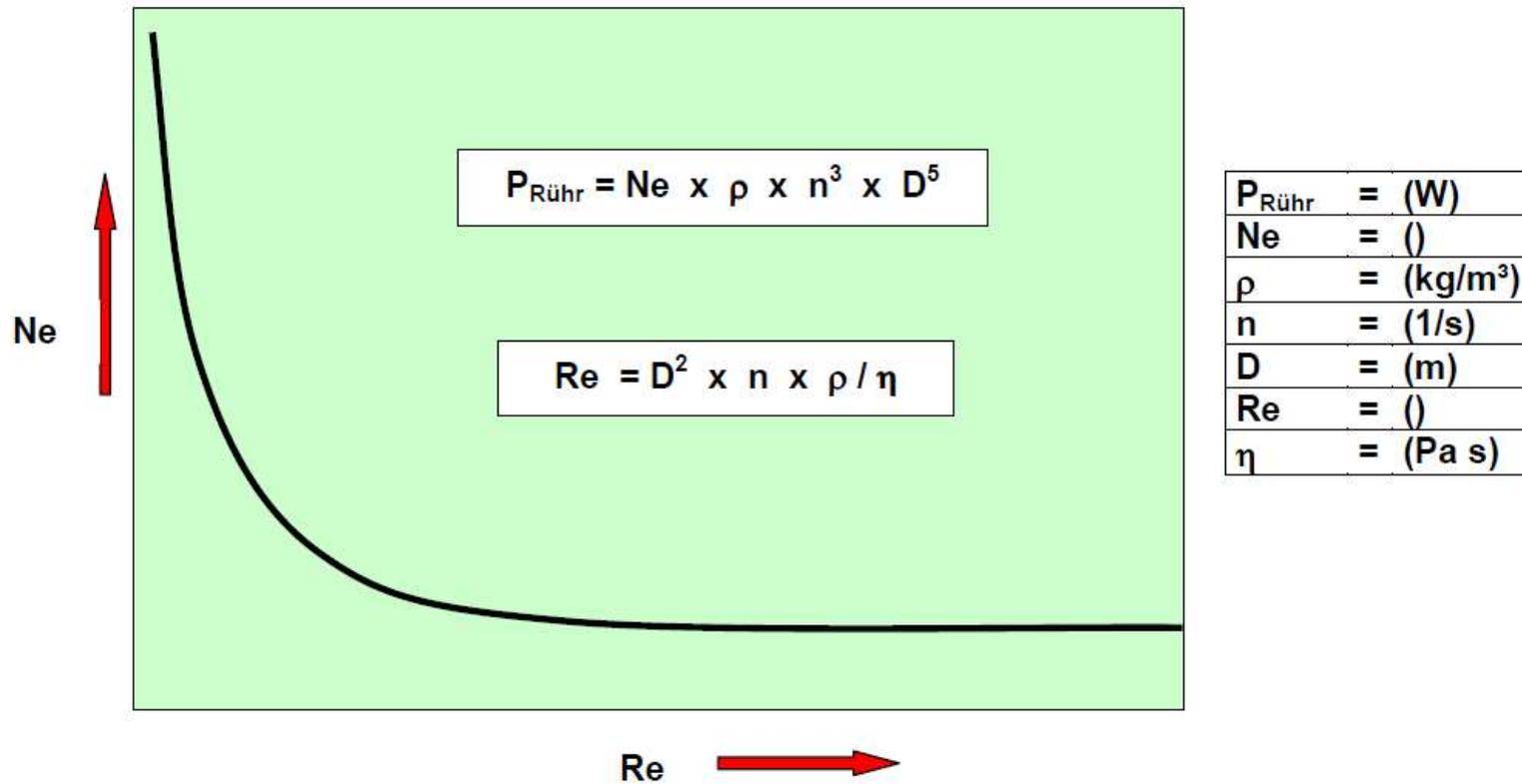


### Rührprobleme aus zu hoher Geschwindigkeit:

- Indikatoren sind hohe sichtbare globale Kreisbewegung
- Geräuschentwicklung wie Schlagen
- starke Vibrationen am Führungsrohr
- Maßnahme partielles Abschalten
- Vorsicht beim Start-up
- Sichtkontrolle einmal pro Woche



Leistungsaufnahme



$P_{Ruehr}$  = Leistung  
 $D$  = Durchmesser

$Ne$  = Newtonzahl  
 $Re$  = Reynoldszahl

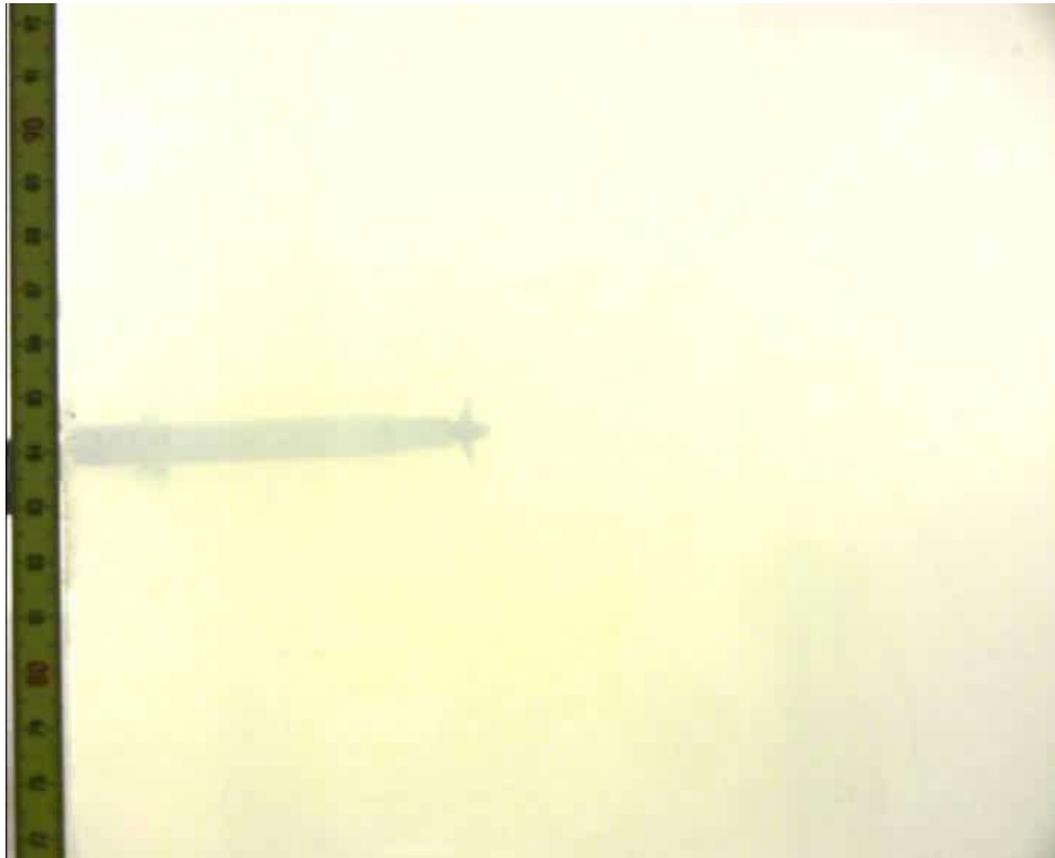
$\rho$  = Dichte  
 $\eta$  = dynamische Viskosität  
 $n$  = Drehzahl

### Leistungsaufnahme

- solange das Rührwerk im turbulenten Bereich arbeitet, wird die Leistungsaufnahme ähnlich wie in Wasser sein
- entscheidend ist die „Scheinviskosität“ am Propeller
- massiver Anstieg des Leistungsbedarfs bei Betrieb im Übergangsbereich und im laminaren Bereich
- Messung des Fließverhaltens ist sinnvoll, um Anwendungsbereich sicherzustellen
- Hersteller sollte in der Lage sein, den Anwendungsbereich zu spezifizieren



## Temperaturproblematik



Quelle: TUB Berlin, Hr. Brehmer

---

### Temperaturproblematik

- Rührwerke laufen bei hohen TS-Gehalten bzw. ausgeprägt strukturviskosen Fließverhalten in einer Kaverne
- dabei wird häufig der Motorkörper nicht umströmt
- dadurch entstehen sehr hohe Temperaturen => Temperaturfühler schaltet ab
- Temperatur wird nicht abgeführt
- Entstehung von Kristallisationskeimen (Struvitbildung)
- Struvit bildet eine massive Isolationsschicht
- eine Temperatur von 10K über zulässiger Wicklungstemperatur führt zu einer Halbierung der Lebensdauer
- künstliche Alterung der Wicklung und damit der Standzeit

## Schwimmdecken

- Gasbläschen haften an Strukturmaterial und schwimmen auf
- Ausbildung eines Kräftegleichgewichtes
- der Effekt ist umso größer, je:
  - geringer die Zähigkeit des Mediums
  - größer die charakteristische Faserlänge



Quelle: [www.kruschitz.com](http://www.kruschitz.com)



Quelle: [www.lohnunternehmen-feuerborn.de](http://www.lohnunternehmen-feuerborn.de)

### Schwimmdecken



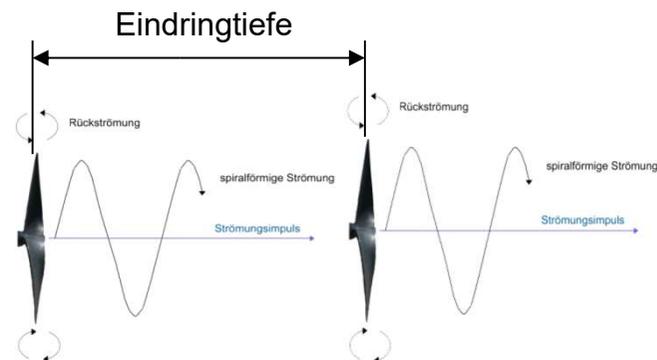
### Schwimmdecken

- Strukturmaterial muss möglichst ähnliches spezifisches Gewicht wie das Gärmedium aufweisen
- häufig Entstehung beim Start-up
- Wie kann eine Schwimmdecke aufgelöst werden?
  - Einrühren in Hauptstrom
  - Benetzen der Oberfläche
  - diskontinuierliches Gegenrühren
  - mäßige Trombenbildung
- Geschwindigkeit kann Turbulenz nicht ersetzen
- Faserlänge reduzieren
- Art der Fütterung und Futtermenge anpassen



## Korrespondenzverhalten

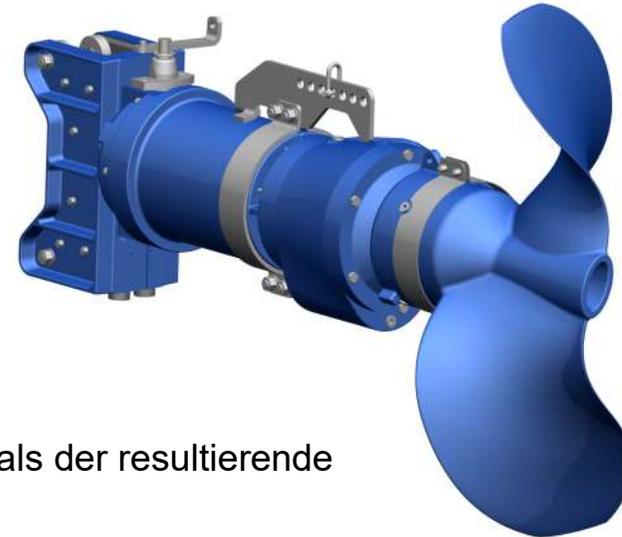
- Verkleinerung des aktiv nutzbaren Fermentervolumens
- erhöht das Risiko von Sedimentationen, Temperaturgradienten sowie Schäden
- fördert das Entstehen von Schwimmdecken
- Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit erhöht die Korrespondenzabstände
- Verringerung der Zähigkeit des Mediums durch Verringerung der Faserlängen oder Zudosierung von Flüssigkeit
- mangelndes Korrespondenzverhalten hemmt den Prozess und erhöht Energiebedarf für das Rühren



## Korrespondenzverhalten

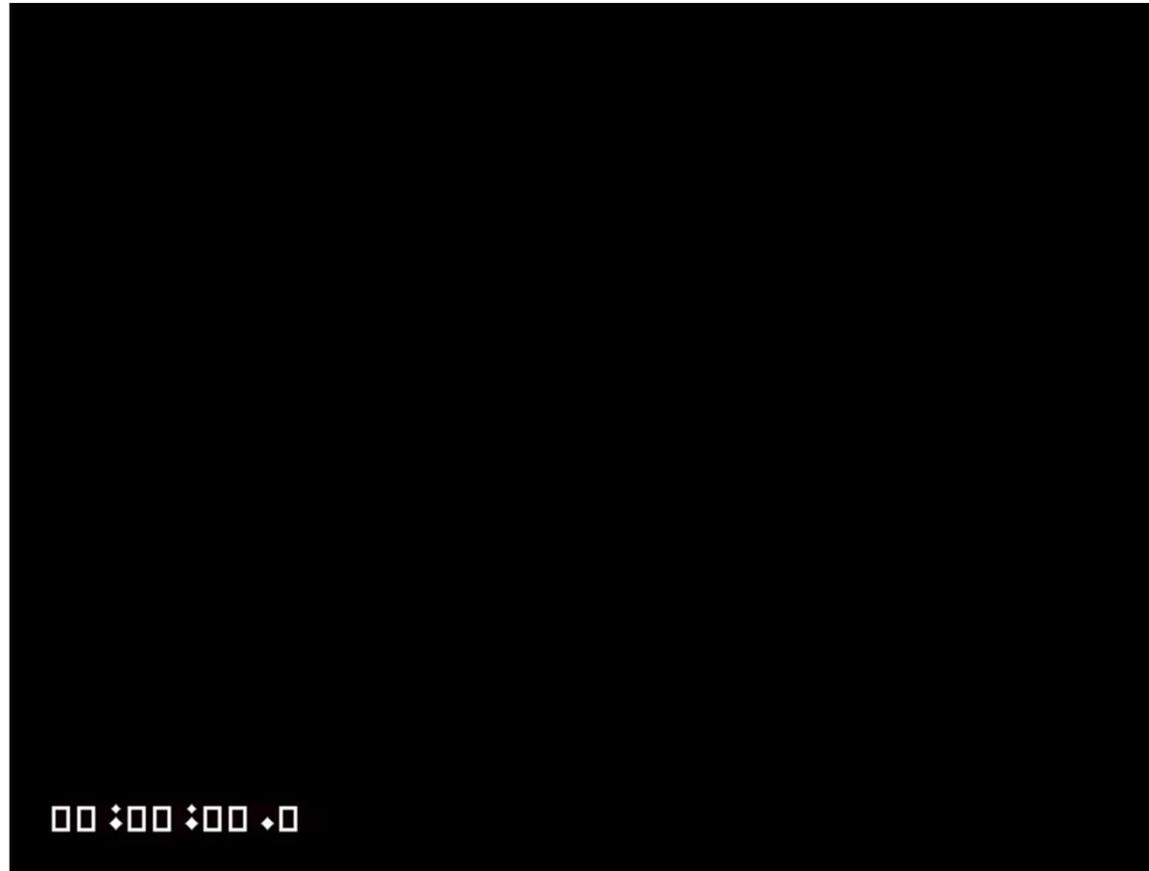


### Sedimentationen



- Kräftegleichgewicht
- Sedimentation, wenn nach unten gerichtete Kraft größer ist, als der resultierende entgegenwirkende Kraftvektor
- Unterscheidung zwischen organischem und mineralischem Sediment
- Entfernung zur Fütterung ist ein entscheidender Faktor (typisch 2 -3 m)
- Turbulenzquelle sollte unmittelbar an der Fütterung sein
- Auflösen der Strukturstoffagglomerate
- zähflüssiges Fließverhalten kann Sedimentationen entgegenwirken
- bei bekannten Sedimentationsproblemen ist entweder die Geschwindigkeit oder der Anteil der Turbulenz im unteren Bereich zu erhöhen

### Teetasseneffekt/ Ablagerungen



---

### Zusammenfassung

- Rühren ist ein Sammelbegriff für verschieden Rühraufgaben mit unterschiedlichen Anforderungen
- Einsatzgrenzen beachten
- Fließverhalten sollte regelmäßig kontrolliert werden
- mittlere gerichtete Geschwindigkeit sollte so gering wie möglich sein
- Turbulenz flexibel zuschaltbar
- Verhältnis aus Axialschub / hydraulischer Leistung und Positionierung den Randbedingungen anpassen

Kay Rostalski  
Geschäftsführer

Tel.: +49 (0) 345/ 68687130

Fax: +49 (0) 345/ 68687131

Mob.: +49 (0) 151/ 21427027

Mail: [k.rostalski@repowering-technik-ost.de](mailto:k.rostalski@repowering-technik-ost.de)

Website: <http://www.repowering-technik-ost.de>