

Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences



Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Lebensmitteltechnologie

Charakterisierung der Beanspruchungsmechanismen scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess

Masterthesis

Verfasser: Anna-Lena Kraft

Vorgelegt am: 30.06.2012

Betreuer: Prof. Dr. Peter Meurer
Dr.-Ing. Achim Knoch

Institut: Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2012-0181-6

Abstract

Mixing and agitation are important process engineering tasks for food industry. Different substances have to be mixed by using high mechanical energy. There are some special problems with big and shear sensitive particles like diced fruits and vegetables as part of the recipe, because they could be damaged. The integrity of these particles is important for the food quality. It is possible that the particles are damaged because of shearing, interactions between particles, flow field or impacts because of the agitators. Up to date there are only experiments with emulsions systems, flakes systems and plant cells. This means behavior of small particles in stirring process. It is not possible to transfer these results to big shear sensitive particles because mechanisms of damaging are different. This master thesis describes the influence of the viscosity of the continuous phase, strength of the particles and percentage of particles on the stress of big shear sensitive particles. Cubes and balls of agar were used as reference product. The damaged particles were evaluated optically. Different stirrer types were tested in a vessel with a volume of five liter. If the different agitators had the same speed, the paddle agitator with four blades and big angular shape is the one with the highest shear rate. The shear rate of the paddle agitator with two blades (\varnothing 106 mm) and the anchor agitator is less intensive. A little bit lower is the shear rate of the paddle agitators with four blades (angular, oval and oval with 45 degree angle). The lowest shear rate had the paddle agitator with two blades (\varnothing 81 mm) and the propeller agitator. Increasing the percentage of particles the integrity of the particles also increases. With decrease in the strength of the particles the integrity of the particles decreases. By increasing the viscosity of the continuous phase the amount of damaged particles has been reduced. The results can be used to configure a stirring process in mixing recipes with big shear sensitive particles, which means, that process parameters can be defined to avoid any damaging of these particles.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	3
3	Stand der Wissenschaft und Technik	4
3.1	Beanspruchungsmechanismen im Rührprozess.....	4
3.1.1	Kräfte auf Partikel im Fluid	4
3.1.2	Bedeutung des Strömungsfeldes	4
3.1.3	Schub- und Dehnspannungen.....	8
3.1.4	Viskosität der kontinuierlichen Phase	10
3.1.5	Stoßbeanspruchung im Rührprozess	11
3.2	Scherbeanspruchung.....	12
3.2.1	Scherbeanspruchung bei Flüssig-Flüssig-Systemen	12
3.2.2	Scherbeanspruchung in biologischen Systemen	13
3.2.3	Scherbeanspruchung bei Fest-Flüssig-Systemen	15
3.3	Messung der Partikelgrößenverteilung.....	17
4	Material und Methoden	18
4.1	Material.....	18
4.1.1	Agar	19
4.1.2	Rührbehälter und Rührertypen	19
4.1.3	Reynoldszahlen	21
4.1.4	Bewehrung	23
4.2	Methoden.....	23
4.2.1	Agarwürfel	23
4.2.2	Agarkugeln	24
4.2.3	Textur der Agarwürfel.....	26
4.2.4	Rühren Hauptversuche	27
4.2.5	Einfluss der Blattgeometrie	28
4.2.6	Kritische Schubspannung.....	29
4.2.7	Viskosität der kontinuierlichen Phase	29
4.2.8	Optische Auswertung der Agarwürfel.....	30
5	Ergebnisse	33

5.1	Textur der Agarwürfel	33
5.2	Charakterisierung der Rührorgane bei gleichen Bedingungen	34
5.2.1	Einfluss der Blattgeometrie	43
5.2.2	Kritische Schubspannung	48
5.3	Unterschiedliche Anteile an Agarwürfeln	51
5.4	Unterschiedliche Festigkeit der Agarwürfel	54
5.5	Erhöhte Viskosität der kontinuierlichen Phase	59
6	Schlussfolgerung und Ausblick	64
7	Zusammenfassung	66

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

D	mm	Behälterdurchmesser
d	mm	Rührerdurchmesser
H	mm	Füllhöhe
h	mm	Rührereinbauhöhe (Rührermitte)
h_B	mm	Rührerblatthöhe
H_{Su}	mm	Bodenabstand des Stromstörers
n	s^{-1}	Drehzahl
l_B	mm	Rührerblattlänge
t	min	Zeit
w'	m/s	turbulente Schwankungsgeschwindigkeit
α	$^\circ$	Anstellwinkel der Rührschaufeln
η	Pas	dynamische Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
τ	N/m^2	Schubspannung
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergeschwindigkeit

1 Einleitung

Mischprozesse gehören in der Lebensmittelindustrie zu den am häufigsten anzutreffenden verfahrenstechnischen Grundaufgaben. Dabei ist das Ziel aller Mischverfahren das Vereinigen von verschiedenartigen Stoffen zu einem Gemisch mit einer möglichst vollkommenen Gleichverteilung. Beim Mischen im Rührbehälter werden entweder Flüssigkeiten miteinander gemischt oder aber gasförmige bzw. feste Stoffe in Flüssigkeiten dispergiert oder gelöst. Zusätzlich ist das Mischen oft notwendig, um chemische Reaktionen, Wärme- und Stoffaustauschvorgänge zu ermöglichen.

In der Lebensmittelindustrie werden zur Haltbarmachung von Gemischen durch Erhitzen schnelle Wärmeaustauschvorgänge angestrebt, die wiederum hohe mechanische Energieeinträge durch den Rührer erfordern. Bei der Herstellung von Gemischen mit scherempfindlichen, grobstückigen Komponenten, wie z.B. Frucht- und Gemüsestücke, bereiten mechanische Energieeinträge jedoch Probleme. Das intensive Rühren führt zur Schädigung der grobstückigen Komponenten. Die Unversehrtheit der Einlagen stellt ein entscheidendes Qualitätskriterium in der Lebensmittelindustrie dar. Eine Schädigung der grobstückigen Komponenten führt folglich zur Qualitätsminderung des hergestellten Produktes.

Ziel ist es, den Rührprozess so zu gestalten, dass zum einen die Schädigung - trotz der Scherempfindlichkeit der Frucht- und Gemüsestücke - vollständig ausgeschlossen wird und folglich die Kanten der Frucht- und Gemüswürfel erhalten bleiben. Zum anderen sollen die Vorgaben der Lebensmittelsicherheit bezüglich der Temperaturführung garantiert werden. Da es sich bei Frucht- und Gemüsestücken um Naturprodukte handelt, kann es saisonale Qualitätsschwankung geben, die zu schwankenden Stoffwerten, z.B. veränderte Textur, führen. Wichtig ist, dass der Rührprozess auf diese schwankenden Stoffwerte individuell eingestellt werden kann.

Bis heute ist nicht bekannt, wodurch die grobstückigen Partikel genau beansprucht werden. Hierbei kann eine durch das Strömungsfeld induzierte Scherbeanspruchung genauso verantwortlich sein, wie die Beanspruchung durch Partikel-Partikel-Zusammenstöße oder die Schädigung durch das Rührorgan. Inwieweit die Viskosität der kontinuierlichen Phase einen Einfluss auf die Schädigung der Partikel hat, ist derzeit weiterhin nicht bekannt. Bislang beziehen sich die wissenschaftlichen Arbeiten nur auf die Beanspruchung von sehr kleinen Partikeln im Rührbehälter. Dabei geht es um die Tropfenbeanspruchung von Emulsionssystemen oder im Bereich der Bioverfahrenstechnik um die Schädigung von Zellen und Zellagglomeraten.

In der Praxis werden die optimalen Betriebsparameter zur Herstellung von Gemischen mit grobstückigen, scherempfindlichen Komponenten (Frucht- und Gemüsezubereitungen) meist über ein

auf „Trial and Error“ basierendem Versuchsprogramm eingestellt. Jede Rezepturänderung erfordert eine Anpassung der Betriebsparameter. Da es sich bei Frucht- und Gemüsestücken zusätzlich um Naturprodukte handelt, deren Qualität natürlichen Schwankungen unterliegen, ist eine ständige Anpassung der Betriebsparameter erforderlich. Dies ist in der Praxis jedoch nur bedingt möglich und somit unterliegt derzeit auch das Endprodukt starken Qualitätsschwankungen.

2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Scherbeanspruchung im Rührprozess in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern zu ermitteln. Bislang wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, welche die Beanspruchung von Tropfen bei Emulsionssystemen oder aber die Beschädigung von Zellen und Zellagglomeraten in Rührprozessen betrachten. Arbeiten zu den Beanspruchungsmechanismen von grobstückigen, scherempfindlichen Gütern in einer kontinuierlichen Phase während des Rührprozesses existieren es bisher nicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst der Einfluss unterschiedlicher Parameter des Rührprozesses auf die Beanspruchung grobstückiger Partikel in einer kontinuierlichen, flüssigen Phase untersucht. Alle Versuche werden mit grobstückigen Partikeln aus Agar als Referenzprodukt durchgeführt, um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch saisonale Qualitätsschwankungen der Naturprodukte ausschließen zu können.

In den Versuchen werden unterschiedliche, im Bereich des Mischens relevante Rührorgane eingesetzt, um den Rührorgantyp zu ermitteln, bei dem die geringste Schädigung der grobstückigen Partikel auftritt. Zum Vergleich der Partikelbeanspruchung in Abhängigkeit des Rührorgans wird einerseits die kritische Schubspannung ermittelt, ab der eine Schädigung der Partikel festzustellen ist. Andererseits wird die Partikelschädigung bei verschiedenen Prozesszeiten und Schubspannungen verglichen. Auch die Viskosität der kontinuierlichen Phase wird variiert. Bei der Herstellung von z.B. Fruchtzubereitungen werden die Früchte in eine hochviskose kontinuierliche Phase eingerührt. Nach Midler und Finn (1966) und Märkl et al. (1987) tritt bei kleinen Partikeln wie Protozoen bzw. Chlamydomonas Stämmen eine Verstärkung der Schädigungseffekte mit zunehmender Viskosität auf. Da eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf größere Partikel nicht möglich ist, wird zusätzlich die Schädigung grobstückiger Partikel während des Rührprozesses in einer hochviskosen kontinuierlichen Phase untersucht. Des Weiteren wird der Anteil der grobstückigen Partikel in einer flüssigen kontinuierlichen Phase variiert. Eine Veränderung des Anteils des Referenzproduktes im Rührprozess könnte Rückschlüsse auf die Beeinflussung der Partikel untereinander ermöglichen. Zudem werden Agarpartikel unterschiedlicher Festigkeit und Form verwendet, um den Einfluss des Rührprozesses auf unterschiedliche Fruchtart bzw. -form nachstellen zu können.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Als Rühren wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem entweder Flüssigkeiten miteinander gemischt werden oder aber feste bzw. gasförmige Stoffe in Flüssigkeiten dispergiert oder gelöst werden. Die Komponenten werden beim Rühren durch Strömungskräfte vermischt, die in der Rührströmung entstehen. Diese Rührströmung entsteht durch das rotierende Rührorgan (Hemming und Wagner 2008).

3.1 Beanspruchungsmechanismen im Rührprozess

3.1.1 Kräfte auf Partikel im Fluid

Bei einem dispersen System befinden sich Partikel (Körner, Tropfen, Blasen) in einem Fluid (Gas oder Flüssigkeit). Das Fluid übt sowohl im Ruhezustand (ohne Relativgeschwindigkeit), als auch bei Bewegung (mit Relativgeschwindigkeit) Kräfte auf jeden Partikel aus. Dabei handelt es sich um Druck- und Reibungskräfte, die an der Oberfläche der Partikel wirken. Durch Beschleunigungsfelder werden Kräfte hervorgerufen, welche an Partikel aufgrund ihrer Masse angreifen. Hierzu zählen die Schwerkraft, Fliehkraft und Trägheitskraft. Stieß (2009) setzt die Kräfte in ein Verhältnis, was die folgende Aussage belegt: Je größer und schwerer ein Partikel ist, desto mehr wird er von Massenkräften beeinflusst. Das Verhalten von kleineren und leichteren Partikeln wird hingegen von Widerstandskräften beeinflusst (Stieß 2009).

Zusätzlich zu den genannten Kräften werden auch noch andere Kräfte auf die Partikel ausgeübt, wenn eine entsprechende Partikel-Volumenkonzentration vorhanden ist. Durch eine hohe Partikel-Volumenkonzentration ist eine gegenseitige Beeinflussung der Partikel möglich. Die Partikel/Partikel-Wechselwirkungen können ab einer Konzentration unter ca. 0,5 Vol. % vernachlässigt werden. Des Weiteren werden sehr kleine Partikel von der Brown'schen Molekularbewegung und von Diffusionsvorgängen beeinflusst (Stieß 2009).

3.1.2 Bedeutung des Strömungsfeldes

Das Strömungsfeld in einem Rührkessel entsteht durch das rotierende Rührorgan. Dabei sind Rührerform, Viskosität der Flüssigkeit und die Rührer-Drehzahl verantwortlich für Art, Stärke und Richtung der Rührströmung. Das Mischgut wird axial vom Rührer angesaugt. Das Rührorgan erfasst das Mischgut und beschleunigt es mit großer Energie entweder axial oder radial. Die Strömungsform ist von der Art des Rührorgans abhängig (Hemming und Wagner 2008).

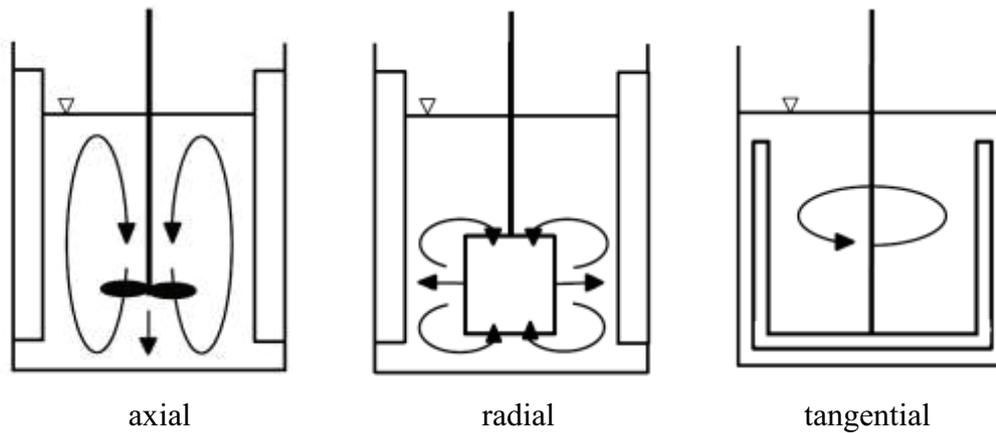


Abb. 1: Strömungsbild unterschiedlicher Rührorgane (Knoch 2000)

Abb. 1 zeigt die drei unterschiedlichen Strömungsfelder, welche durch verschiedene Rührorgane erzeugt werden können. Die mechanische Beanspruchung im Rührprozess wird aufgrund der Flüssigkeitsbewegung erzeugt. Diese ist für das Durchmischen, Suspendieren und den Wärmeübergang im Rührbehälter notwendig und die Partikel folgen dieser Flüssigkeitsbewegung. Die Scherbeanspruchung resultiert hauptsächlich aus der Intensität der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit.

Die Schubspannung τ ist nach dem Reynoldschen Spannungsansatz gemäß

$$\tau = \rho * \overline{w'^2} \quad (1)$$

zu berechnen. Dabei wird die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit w' über den Wirbel-durchmesser ermittelt und ρ ist die Dichte der kontinuierlichen Phase. Maximale Werte der Schwankungsgeschwindigkeit konnten bislang in unmittelbarer Nähe des Rührorgans nachgewiesen werden. Je größer der Abstand zum Rührorgan ist, desto kleiner wird die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit. Sie ist unmittelbar von der Rührergeometrie und der Rührerdrehzahl abhängig (Thomae 1970; Liepe 1971).

In Abb. 2 sind die Effektivwerte der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Radius und der Höhe des Behälters dargestellt.

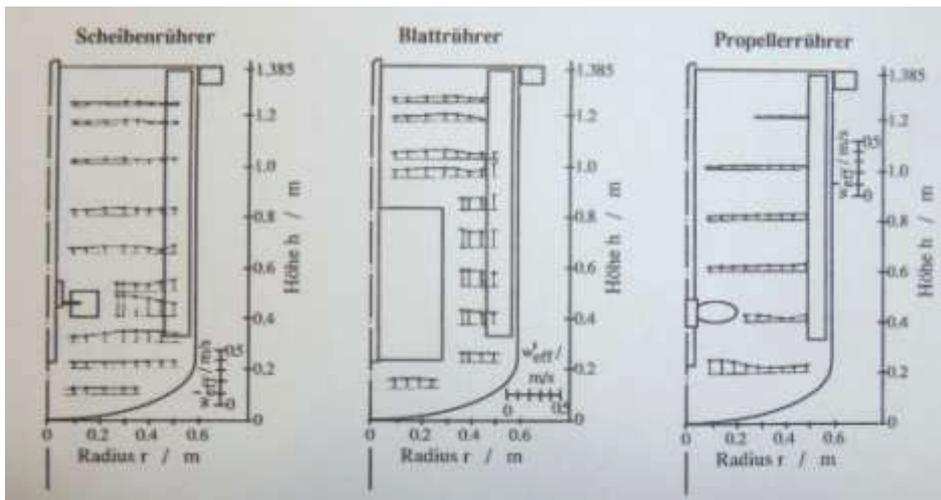


Abb. 2: Effektivwerte der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit für den Scheiben-, Blatt- und Propellerrührer (Lohr 1975)

Die Messungen erfolgten jeweils in Richtung des Hauptströmungsvektors. Der radial fördernde Scheibenrührer weist die höchste Schwankungsgeschwindigkeit an der Außenkante des Rührblattes auf. Die größte turbulente Schwankungsgeschwindigkeit des Blattrührers ist über die gesamte Blatthöhe in Höhe des Rührorgans zu sehen. Im Gegensatz dazu weist der axial fördernde Propellerrührer eine geringere turbulente Schwankungsgeschwindigkeit auf. Bei allen Rührorganen ist die größte turbulente Schwankungsgeschwindigkeit in der jeweiligen Ausströmzone ermittelt worden. Der Propellerrührer musste für die Darstellung der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit im Vergleich zum Scheibenrührer mit doppelter Drehfrequenz gefahren werden. Dadurch lässt sich der Einfluss der Geometrie des Rührorgans auf die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit feststellen. Werden die Ergebnisse auf die gleiche Umfangsgeschwindigkeit bezogen, so führt der Propellerrührer zu den kleinsten und der Blattrührer zu den größten Effektivwerten der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit (Knoch 2000).

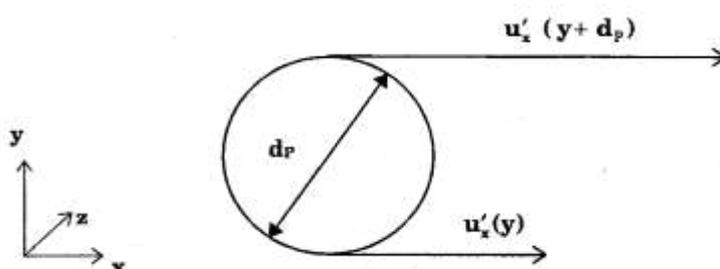


Abb. 3: Schematische Darstellung der an einem Tropfen mit dem Durchmesser d_p angreifenden Schwankungsgeschwindigkeit in x-Richtung (Wille 2000)

Abb. 3 verdeutlicht das Angreifen der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit an zwei gegenüberliegenden Punkten eines Tropfens.

Die Ermittlung der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit ist aufwendig und setzt komplexe Messtechniken und transparente Modellfluide voraus. Eine Übertragung der heute vorliegenden empirischen Daten auf die Verarbeitung realer Rührgüter mit grobdispersen Partikeln, wie zum Beispiel Fruchtzubereitungen, erscheint nicht aussichtsreich. Die erhöhten Viskositäten der Rezepturen in Verbindung mit niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten der Rührer, führen gerade nicht zur Ausbildung einer vollständig turbulenten Strömung.

Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{n * d^2}{\nu} = \frac{n * d^2 * \rho}{\eta} \quad (2)$$

beschreibt den Strömungszustand im Rührbehälter und unterscheidet allgemein zwischen den folgenden drei Strömungsbereichen:

$Re < 10$	laminarer Strömungsbereich	
$10 < Re < 10^4$	Übergangsbereich	
$Re > 10^4$	turbulenter Strömungsbereich	(Biedermann 1994).

Durch Übersteigen der Trägheitskräfte gegenüber den Zähigkeitskräften eines Fluids kommt es zum Umschlag von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung (Herrmann 2002). Laminare Strömungen existieren vorwiegend in Grenzschichten und haben lediglich eine untergeordnete Bedeutung. Es ist möglich mit einer laminaren Strömung zu rühren, aber dies wird vorwiegend mit hochviskosen Fluiden durchgeführt, deren Viskosität der einer Fruchtzubereitung übersteigt. Die turbulente Strömung liegt hingegen im kompletten Rührbehälter vor und wird durch die Bewegung des Rührers erzeugt. Im Gegensatz zur laminaren Strömung, wird bei der turbulenten Strömung die Grundströmung durch das Auftreten von Wirbeln überlagert. Erklärbar ist die Turbulenz der Strömung durch Wirbel von unterschiedlicher Größe. Die Wirbel lassen sich hinsichtlich ihrer Größe und ihres Energiegehaltes in verschiedene Klassen unterteilen. Dabei wird jede Wirbelklasse durch sog. Makromaße, wie Längenmaß und Geschwindigkeit gekennzeichnet (Brunn 2010). Während Biedermann (1994) davon ausgeht, dass die Größe der Makrowirbel ungefähr dem Durchmesser des Rührblattes entspricht, ist nach Wollny (2010) die Größe der Makrowirbel gleich der halben Rührblatthöhe. Diese Makrowirbel zerfallen kaskadenartig in immer kleinere Wirbel, wobei auch die Bewegungsenergie übertragen wird.

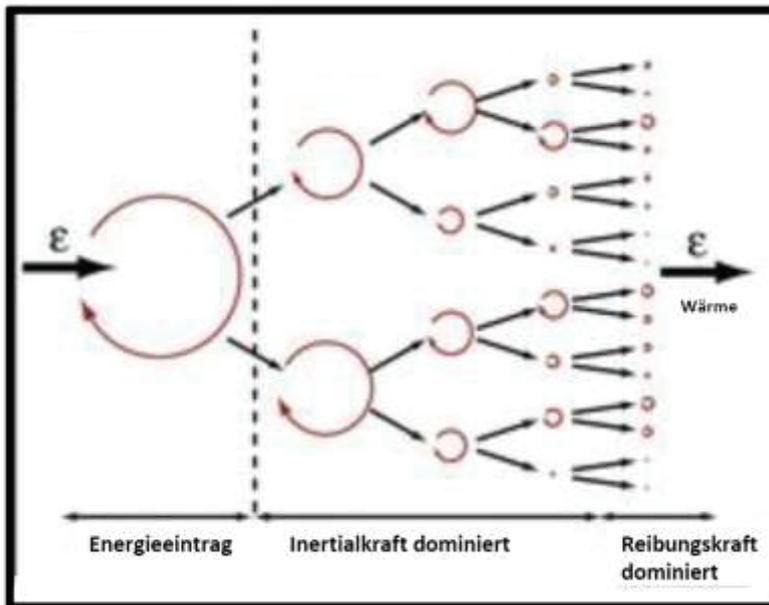


Abb. 4: Kaskadenartiger Zerfall der Makrowirbel (Bodenschatz 2009)

Abb. 4 zeigt den kaskadenartigen Zerfall der Makrowirbel. Dieser Zerfall findet solange statt, bis die Reibungsenergie, welche infolge der Fluidviskosität vorhanden ist, dominant gegenüber der kinetischen Energie der Wirbel ist (Wollny 2010). Je kleiner die Wirbel sind, desto geringer ist auch ihr Energiegehalt. Sind die Wirbel deutlich größer als die Partikel, so folgen die Partikel den Wirbeln, wie einer konvektiven Bewegung. Kleinere Wirbel haben eine zu geringe Intensität, um die Partikel zu zerstören. Wirbel in einer vergleichbaren Größe der Partikel sind entscheidend für die Zerstörung der Partikel (Biedermann und Henzler 1996).

Die im Rührbehälter entstehende dreidimensionale Strömung wurde zwar teilweise analytisch behandelt, dennoch sind die Ergebnisse nicht auf grobe, disperse Phasen übertragbar. Bislang wird zu deren Beschreibung die statische Turbulenztheorie angewendet. Es ist allerdings anzumerken, dass der Einfluss des Volumenanteils auf die sich einstellende Partikelgröße noch nicht befriedigend geklärt ist (Mersmann, Grossmann 1978).

3.1.3 Schub- und Dehnspannungen

Der physikalische Hintergrund der Beanspruchung im Rührprozess sind die Scherkräfte, die über das Rührorgan und die induzierte Strömung im Rührprozess eingetragen werden. Das Prinzip der Scherbeanspruchung im Rührbehälter wird durch Abb. 5 verdeutlicht. Hierbei erfährt das Volumenelement eine Schubspannung τ .

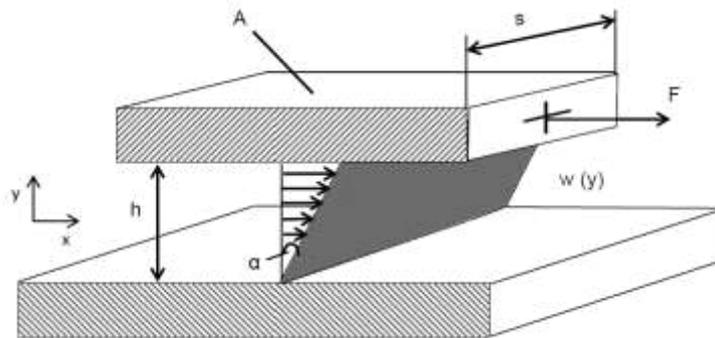


Abb. 5: Schergefälle in einem Fluidelement zwischen zwei parallelen Platten (Pahl, Gleißle, Laun 1991)

Die untere Platte der Abbildung ist unbeweglich; die obere Platte wird durch die Kraft F mit der Geschwindigkeit w verschoben. Die Kraft bezogen auf die Fläche A der oberen Platte wird als Schubspannung τ bezeichnet. Durch die Verschiebung der Platte kommt es zu einem Geschwindigkeitsgefälle innerhalb des Volumenelementes. Die Geschwindigkeit der Flüssigkeit an der unteren Platte beträgt aufgrund der Haftbedingungen $w = 0$ m/s. An der oberen Platte ist die Geschwindigkeit der Flüssigkeit gleich der Geschwindigkeit der bewegten Platte. Der Geschwindigkeitsgradient wird als Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ bezeichnet. Die dynamische Viskosität ist das Verhältnis zwischen Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$.

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

(Pahl, Gleißle, Laun 1991)

In der Literatur werden weiterhin Näherungsverfahren vorgestellt, die es ermöglichen, eine mittlere Schubspannung im Rührbehälter zu berechnen, auch für die Verarbeitung nicht-newtonscher Stoffsysteme. Das Verfahren von Metzner/Otto (Metzner und Otto 1957; Metzner et al. 1961) ermöglicht eine Zuordnung von Drehzahl n und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gemäß

$$\dot{\gamma} = k_{MO} * n. \quad (4)$$

Die sogenannte Metzner/Otto-Konstante k_{MO} ist geometrieabhängig und liegt für unterschiedliche Rührorgane vor. Letztlich besteht auf diese Weise über die Fließfunktion

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

die Möglichkeit einer Zuordnung zwischen Schubspannung und Drehzahl (Todtenhaupt 2000; Pahl et al. 1998). Es gibt noch zahlreiche andere Verfahren, welche eine Zuordnung zwischen Schubspannung und Drehzahl ermöglichen. Allerdings handelt es sich dabei wie bei der Metzner/Otto-Konstante nur um Näherungsverfahren, welche jedoch die für die Beanspruchung verantwortlichen Schubspannungsspitzen nicht abschätzen können.

Van den Tempel (1977) ist einer der ersten Autoren, der festgestellt hat, dass in einigen verfahrenstechnischen Prozessen Dehnströmungen auftreten, die einen Einfluss auf die Produkteigenschaften haben können. Bei genauer Betrachtung von Strömungsprozessen, treten Dehnströmungsfelder immer dann auf, wenn Fluidelemente einer Beschleunigung unterliegen. Es wird besonders auf das Auftreten von Dehnströmungen in Rührbehältern hingewiesen, die durch die Beschleunigung der Flüssigkeit in Rührernähe entstehen. Beim axialfördernden Propellerrührer treten Dehnströmungen vorwiegend im Bereich des axialen Austritts der Flüssigkeit Richtung Behälterboden unterhalb des Rührers auf. Die Partikelbeanspruchung in Rührbehältern wird hauptsächlich durch Scherströmungen gekennzeichnet. Die Dehnströmungen haben nur einen geringeren Anteil an der Gesamtströmung, dennoch haben sie eine größere Effizienz hinsichtlich der Partikelzerkleinerung. Selbst unter Einbeziehung der Dehnströmungen können die Dispergieigenschaften von Axial- und Radialrührern nicht erklärt werden. In der Regel existiert demnach eine Kombination von Scher- und Dehnströmungen. Welche Faktoren dazu beitragen, dass eine Strömungsform stärker oder schwächer zum Tragen kommt und welchen Beitrag sie zur Zerkleinerung von Partikeln leisten, ist bislang noch nicht erforscht. Fest steht, dass Tropfen und Partikelagglomerate in Dehnströmungen stärker beansprucht werden, als in Scherströmungen. Der Grund hierfür ist, dass Partikel in einer Dehnströmung keine Rotation erfahren. In einer Scherströmung rotieren sie und somit ist die Partikeloberfläche bei einer Umdrehung wechselnden Zug- und Druckspannungen ausgesetzt. Obwohl Dehnströmungen nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der gesamten Strömung haben, wirken sie sich in Verbindung mit Rührprozessen stark produktverändernd aus (Langer und Deppe 2000; Wille 2000; Van den Tempel 1977).

3.1.4 Viskosität der kontinuierlichen Phase

Die Viskosität spielt für den Rührprozess eine große Rolle, da die Mischbarkeit der Komponenten von der Viskosität der Flüssigkeit abhängig ist. Je niedriger die Viskosität der kontinuierlichen Phase ist, desto leichter mischbar sind die Komponenten. Auch erfordert ein zähflüssiges Mischgut zur Durchmischung Rührorgane, die ein intensives Strömungsfeld erzeugen können.

Hierzu zählen zum Beispiel der Anker-, der Wendel- und der Blattrührer, denn diese Rührer ermöglichen einen gleichmäßigen Energieeintrag. Die Durchmischung des Rührgutes erfolgt durch den lokalen Energieeintrag. Eine Eigenrotation sollte durch Strombrecher vermieden werden, da sie eine optimale Durchmischung des Rührgutes behindert. Je niedriger die Viskosität der kontinuierlichen Phase, desto größer ist die Neigung zur Eigenrotation (Hemming, Wagner 2008). Neben der Viskosität der kontinuierlichen Phase ist es weiterhin entscheidend, ob es sich um ein newtonsches oder nicht newtonsches Fluid handelt. Ein Fluid ist nicht newtonsch, wenn die Viskosität η

$$\eta = f(\dot{\gamma}) \quad (6)$$

von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ abhängig ist. Im Rührbehälter erfolgt durch das Rührorgan ein lokaler Energieeintrag, sodass unterschiedliche Schergeschwindigkeitsbereiche vorhanden sind. An den Randbereichen des Rührbehälters ist die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ klein und somit ist die Viskosität η größer. Im Gegensatz dazu, ist die Schergeschwindigkeit in unmittelbarer Nähe des Rührorgans groß und die Viskosität kleiner. Durch diesen Effekt wird die Durchmischung des Rührgutes erschwert. Zu den nicht newtonschen Fluiden zählen zum Beispiel Joghurt, Quark und Schmand.

Die Viskosität der newtonschen Fluide ist hingegen unabhängig von der Schergeschwindigkeit. Zu den newtonschen Fluiden gehören zum Beispiel Wasser, Glucoselösungen und Pflanzenöle (Liepe et al 1998; Truckenbrodt 2008).

3.1.5 Stoßbeanspruchung im Rührprozess

Verantwortlich für die Partikelbeanspruchung ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Flüssigkeit. Meistens haben die disperse und die kontinuierliche Phase eine unterschiedliche Dichte. Aufgrund dieser Dichtedifferenz unterscheiden sich auch deren mittlere Strömungsgeschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass es zu Berührungen zwischen den Partikeln oder den Partikeln und der Behälterwand bzw. dem Rührorgan kommt. Diese Berührung wird auch als Stoßbeanspruchung bezeichnet (Henzler, Biedermann 1996).

Aufgrund der Trägheit von Partikeln kommt es zu Kollisionen zwischen Partikeln und Behälterwand. Dabei geben die Partikel einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Behälterwandung ab, was zu einer plastischen Verformung von Partikel und Behälterwand (nur theoretisch) führt. Durch Kollisionen zwischen Partikeln kommt es zu zufälligen Änderungen der Partikelbahnen und -geschwindigkeiten. Eine exakte Formulierung der hier entstehenden Effekte ist bislang

nicht möglich. Verantwortlich für eine gegenseitige Beeinflussung der Partikel ist eine hohe Partikel-Volumenkonzentration. Die Partikel-Partikel-Wechselwirkungen können bei einer Konzentration unter ca. 0,5 Vol. % vernachlässigt werden (Stieß 2009). Des Weiteren gibt es noch Kollisionen zwischen Partikel und Rührorgan. Diese Stöße führen dazu, dass das Rührorgan einen erhöhten Widerstand erfährt und somit die benötigte Rührerleistung steigt. Diese Stoßbeanspruchung ist ähnlich wie die zwischen Partikel und Behälterwand, allerdings müssen hier noch die entstehende Verdrängungsströmung und die veränderten Druckverhältnisse am Rührerblatt beachtet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel, der sich im direkten Einflussbereich des Rührers befindet, mit dem Rührorgan kollidiert, hängt von der Geometrie, der Blattzahl und der Drehzahl des Rührers ab (Liepe et al 1998).

3.2 Scherbeanspruchung

3.2.1 Scherbeanspruchung bei Flüssig-Flüssig-Systemen

Gerade im Bereich der Rührtechnik gehört das Emulgieren zu den verfahrenstechnischen Grundaufgaben. Aufgrund dessen gibt es zahlreiche Untersuchungen, die sich mit der Tröpfchenbildung auseinandersetzen. Bei der Emulsionsbildung wird die Phasengrenzfläche der Tröpfchen stark vergrößert. Da Flüssigkeiten dazu streben, ihre Phasengrenzfläche auf ein Minimum zu reduzieren, ist die Grenzflächenvergrößerung nur unter Energiezufuhr möglich. In Abb. 6 ist exemplarisch der Zerfall einer Fettkugel beim Homogenisieren dargestellt. Durch die Krafteinwirkung kommt es letztendlich zum Zerfall der Fettkugel und es entstehen mehrere kleine Fettkügelchen.



Abb. 6: Fettkugelzerfall beim Homogenisieren (Kessler 1992)

Für die Emulgiereigenschaften sind Rührertyp, Apparategeometrie, Betriebsbedingungen und die Eigenschaften zwischen kontinuierlicher und disperser Phase entscheidend. Der Einfluss dieser Parameter auf den Emulgierprozess wurde von einigen Autoren untersucht (Wollny und Sperling 2007; Liepe et al. 1998; Kipke 1984; Mersmann und Großmann 1980). Die Tropfenzerkleine-

nung basiert auf dem mechanischen Energieeintrag, weshalb nachfolgend die derzeitigen Ergebnisse vorgestellt werden.

Die Beanspruchung der Tropfen im Rührapparat ist auf das Strömungsfeld zurückzuführen. Um eine Tröpfchenzerkleinerung zu erreichen, muss es sich um eine turbulente Strömung handeln. Für die Zerkleinerung von Partikeln in turbulenten Rührströmungen sind die Scherkräfte, die durch die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit der Strömung entstehen, verantwortlich. Hohe Scherspannungen treten insbesondere in unmittelbarer Nähe zum Rührorgan auf. Bei Untersuchungen zu den Dispergiereigenschaften verschiedener Rührertypen wurde festgestellt, dass axialfördernde Rührorgane, wie zum Beispiel der Schrägblatt- und Propellerrührer, eindeutige Vorteile gegenüber radialfördernden Rührorganen, wie dem 6-Blatt-Scheibenrührer, besitzen - bei gleichem Leistungseintrag. Die geringste Beanspruchung erzeugt der primär tangentialfördernde Ankerrührer (Henzler, Biedermann 1996; Biedermann 1994; Wille 2000).

Nach Geisler (1991) stehen diese Ergebnisse aber im Widerspruch zu Turbulenzmessungen in Rührbehältern. Hierbei wurden beim radialfördernden 6-Blatt-Scheibenrührer wesentlich größere turbulente Schubspannungen festgestellt, als beim axialfördernden Propellerrührer. Zusätzlich erzeugt ein strömungsgünstiger bzw. hydrodynamischer Propellerrührer bei gleicher Drehzahl wesentlich geringere Scherkräfte als ein strömungsungünstig geformter Rührer, sodass ein strömungsungünstig geformter Rührer zu einer höheren Tröpfchenzerkleinerung führt.

Nach A. Mersmann und H. Großmann (1980) sollten Rührer zum Dispergieren im Vergleich zum Gesamtvolumen des Rührbehälters kleine Scherfelder haben, d.h. es sollte ein kleines d/D -Verhältnis und somit ein hoher lokaler Energieeintrag vorliegen. Als typische Dispergierrührer werden deshalb Rührer mit hoher Widerstandszahl, d.h. großen Projektionsflächen in Drehrichtung bezeichnet.

Letztendlich werden mit großflächigen, radialfördernden Rührern bei konstantem Leistungseintrag die kleinsten Partikelbeanspruchungen verursacht. Axialfördernde Rührer erzeugen bei gleichem Leistungseintrag deutlich kleinere Partikel als radial fördernde Rührer (Wollny und Sperling 2007).

3.2.2 Scherbeanspruchung in biologischen Systemen

Die mechanische Beanspruchung im Rührbehälter ist auch in der Biotechnologie von entscheidender Bedeutung. Über das Strömungsfeld wird eine optimale Nährstoff-, Substrat- und Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen gewährleistet. Die induzierten Scherkräfte können aber zu

einer Beeinträchtigung der Stoffwechselaktivität bis hin zum Abtöten der scherempfindlichen Mikroorganismen führen (Biedermann 1994).

Bislang sind einige Untersuchungen zur Schädigung von Tierzellen und mikrobiellen Kulturen in unbegasteten Rührreaktoren durchgeführt worden. Kennedy (1967) überprüfte am Beispiel von Protozoen den Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Schädigung der Mikroorganismen. Er ging davon aus, dass sich in direkter Rührernähe eine Zone hoher Belastung für die Organismen befindet. Hierbei kam er zu dem Ergebnis, dass das Ausmaß der Zellschädigung von der Häufigkeit der Belastung abhängig ist, d.h. von der Zirkulationszeit.

Midler und Finn (1966) untersuchten ebenfalls am Beispiel von Protozoen den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Schädigung von Mikroorganismen. Sie setzten die erhaltenen Ergebnisse in Bezug zur Drehzahl und stellten fest, dass mit Zunahme der Drehzahl die Schädigung steigt. Wenn als Bezugsgröße der Leistungseintrag verwendet wird, dann kann mit zunehmender Blatthöhe die Schädigung der Zellen vermindert werden. Letztlich ist der Leistungseintrag bei größerer Blatthöhe auf eine größere lokale Fläche verteilt.

Reuß (1987) untersuchte die Schädigung eines mycelbildenden Pilzes in einem Rührfermenter. Dabei setzte er die im Reaktor bezogene Leistung, die volumenabhängig ist, in Beziehung zur Schädigung des Organismus. Die Rührerdrehzahl blieb konstant und lediglich der Fermenterinhalt wurde reduziert. Durch die Verringerung des Fermenterinhaltess nahm die Geschwindigkeit der Strömung bei gleichem lokalem Energieeintrag zu. Dadurch gab es mehr Berührungen zwischen Zellen und Rührer, was zu einer Wachstumsverlangsamung führte. Der Einfluss der Rührerumfangsgeschwindigkeit kann somit ausgeschlossen werden. Bei Erhöhung der Rührerdrehzahl kommt es, wie erwartet, zu einer Verminderung der spezifischen Wachstumsrate.

Wutke (1988), Kramer (1980), Tramper und Vlák (1987), Abu-Reesh und Kargi (1989) untersuchten unter definierten Strömungsbedingungen die Belastbarkeit von wachsenden Tierzellen in Suspensionen. Alle Autoren fanden auch für relativ kleine Scherbelastungen messbare Werte der Zellschädigung. Durch kinetische Analysen kann eine Proportionalität zwischen der spezifischen Sterberate und der Schubspannung festgestellt werden.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Versuchen mit tierischen Zellen wurde auch der Einfluss verschiedener Rührorgane, Rührergrößen und Rührerdrehzahlen auf Tabak-Pflanzenzellen untersucht. Die Veröffentlichung von Hooker und Lee (1990) beschreibt eine Zunahme der Schädigung der Zellen bei Vergrößerung der Drehzahl mit einem 4-Blattrührer. Bei gleich bleibender Drehzahl und ansteigender Blatthöhe des Rührorgans wird die Schädigung der Zellen größer.

Der Einfluss der Viskosität des Kulturmediums auf die mechanische Belastung einer Kultur wird in der Literatur unterschiedlich beurteilt. Während Tanaka et al (1975) bei *Mucor javanicus* eine

geringere Zellschädigung mit steigender Viskosität registrierte, beobachteten Midler und Finn (1966) und Märkl et al. (1987) bei Protozoen bzw. Chlamydomonas Stämmen eine Verstärkung der Schädigungseffekte mit zunehmender Viskosität.

3.2.3 Scherbeanspruchung bei Fest-Flüssig-Systemen

Biedermann (1994) untersuchte mittels eines Tonmineral-Flocken-Systems die Scherbeanspruchung im Rührbehälter. Dafür musste zuerst ein bestimmter Flockungszustand hergestellt werden, um für alle Versuche die gleichen Ausgangsbedingungen zu gewährleisten. Für die Untersuchungen wurden sowohl axial- als auch radialfördernde Rührer mit unterschiedlichen d/D -Verhältnissen eingesetzt. Der Leistungseintrag wurde konstant gehalten und die verschiedenen Rührorgane miteinander verglichen. Hier wurde deutlich, dass die Rührergeometrie einen deutlichen Einfluss auf die Scherbeanspruchung hat. Radialfördernde Rührer mit großem relativem Blatthöhe-Rührerdurchmesser Verhältnis (h_B/d) und großem Rührer- zu Behälterdurchmesser Verhältnis (d/D) verursachen die geringste Beanspruchung der Flocken. Damit sind vor allem Anker- und Blattrührer gemeint. Je kleiner das d/D -Verhältnis, desto stärker ist die mechanische Beanspruchung der Tonmineral-Flocken. Den Ergebnissen zufolge verursachen axialfördernde Rührer eine hohe Flockenzerstörung. Im Gegensatz zu den radialfördernden Rührern lässt sich bei den axialfördernden Rührern keine interne Gesetzmäßigkeit bezüglich der Zerstörungsintensität und dem d/D -Verhältnis feststellen. Lediglich bei den Schrägblattrührern können geringfügige Abhängigkeiten zwischen den Geometrieparametern (Blatthöhe und Blattanstellwinkel) beobachtet werden. Einen weiteren Einfluss der Geometrieparameter zeigt der Scheibenrührer, der mit höherer Blattzahl, größerem h_B/d und d/D -Verhältnis eine geringere Zerstörung aufweist. Dieselben Beobachtungen wurden für den Blattrührer gemacht, d.h. je größer das d/D -Verhältnis, desto geringer ist die Flockenzerstörung. Zudem lassen sich dieselben Einflüsse der Blattzahl und der Blatthöhe auf den Vergleichspartikeldurchmesser erkennen, d.h. die Flockenzerstörung nimmt mit geringerer Blattzahl zu. Nach Biedermann (1994) ist eine hohe Blattzahl deshalb schonender für das Flockensystem, weil sich die Strömung an den Rührblattkanten anders ablöst und dadurch weniger schädigende Verwirbelungen hinter den Rührblättern entstehen.

Entgegen Biedermann (1994) gelten nach Voß (1992) axialfördernde Rührer als besonders scherarm, wenn die Zerstörung in Abhängigkeit von der Rührleistung betrachtet wird. Deshalb wurden die axialfördernden Rührer bisher vor allem in der Fermentationstechnik eingesetzt. Bei den Versuchen von Biedermann (1994) hingegen zeigen die axialfördernden Rührer die stärkste

Scherbeanspruchung, wenn diese über den Leistungseintrag verglichen wurden. Lediglich der Propellerrührer verursachte eine geringe Flockenzerstörung und somit einen großen Flockendurchmesser. Letztendlich erwiesen sich bei den radialfördernden Rührern die Blatthöhe, Blattanzahl und das Rührer- zu Behälterdurchmesser Verhältnis als die wichtigen Geometrieparameter. Bei den axialfördernden Rührern konnten Abhängigkeiten zwischen der Blatthöhe und dem Anstellwinkel festgestellt werden. In dieser Gruppe spielen die Rührer- zu Behälterdurchmesser Verhältnisse nur eine untergeordnete Rolle. Zusätzlich können auch eine geringe Schaufelzahl und ein kleinerer Schaufelwinkel zu einer stärkeren Partikelbeanspruchung führen. Die axialfördernden Rührorgane sollen eine deutlich höhere Scherbeanspruchung verursachen, als radialfördernde Rührorgane, d.h. dass es nach Henzler und Biedermann (1996) keine direkte Korrelation zwischen Leistungseintrag und Scherbeanspruchung gibt. Die Leistung ist somit nicht allein für die Beanspruchung der Partikel relevant. Bei allen Rührern zeigen die Einbauhöhe des Rührers und die Behälterform (Klöpfer-, Flachboden) keinen Einfluss auf die Flockengröße (Biedermann 1994).

Langer und Deppe (2000) haben Messungen zur Zerkleinerung eines Flockensystems in einer turbulenten Rührströmung durchgeführt, die mit einer makroskopischen Dehnströmung überlagert ist. Wenn man diese Flockenzerkleinerung mit der einer turbulenten Scherströmung vergleicht, dann stellt man fest, dass die turbulente Strömung mit überlagerter Dehnströmung zu einer wesentlich effektiveren Zerkleinerung der Flocken führt.

Für die Auswertung der Literatur ist die Bezugsgröße ein wichtiger Faktor. Der Vergleich der Rührorgane erfolgt entweder über die Drehzahl bzw. Umfangsgeschwindigkeit oder aber über den Leistungseintrag. Erfolgt der Vergleich der Rührorgane über die Drehzahl, so werden axial fördernde Rührer, die eine geringe Leistungsaufnahme aufweisen als scherarm eingestuft. Im Gegensatz dazu werden radial fördernde Rührer, die eine hohe Leistungsaufnahme aufweisen, als scherintensiv bezeichnet. Beim Vergleich der Rührorgane bei gleicher spezifischer Leistung, zeigen sich axial fördernde Rührer als sehr scherintensiv.

Die bisher vorliegenden Ansätze können nicht unmittelbar auf das Rührern grober Partikel übertragen werden, da diese nicht die Beanspruchung grobstückiger Güter wie Früchte, Frucht- und Gemüsestücke untersucht haben. Somit beziehen sich die bereits diskutierten Arbeiten auf vollständig andere Stoffsysteme und berücksichtigen nicht die Größe der Partikel, sodass diese generell nicht auf die Beanspruchung von Rührgütern mit grobdispersen Anteilen bezogen werden können. Auch aus dem Bereich des Feststoffmischens ist keine Übertragung der Methoden möglich, obwohl die Verarbeitung von Schüttungen beim Feststoffmischen auch mit groben Partikeln

erfolgt. Bei der Verarbeitung von Schüttungen führen allerdings andere Mechanismen, wie z.B. Abriebeffekte, zu einer Beanspruchung der groben Partikel (Hemming/Wagner 2008).

Aufgrund dessen sollen in der vorliegenden Arbeit Versuche durchgeführt werden, welche die verantwortlichen Mechanismen, die zu der Schädigung der grobstückigen Partikel im Rührbehälter führen, charakterisiert werden.

3.3 Messung der Partikelgrößenverteilung

Um eine Partikelgrößenverteilung zu erfassen, gibt es verschiedene Analysenmethoden: Sedimentations-, Trenn- und Zählverfahren (Polke et al 1993). Für die Bestimmung der Flockengrößen scheiden nach Biedermann (1994) Trennverfahren aus, da diese zu einer Veränderung und Beschädigung der Flocken führen. Hier werden vorwiegend klassische Zählverfahren eingesetzt, wie die Mikroskopie oder die Bildanalyse. Da es sich hierbei um zeitaufwändige Methoden handelt, welche zusätzlich eine starke Verdünnung der Probe erfordern, können mittlerweile kommerzielle Geräte eingesetzt werden, die eine möglichst direkte, schnelle, sensitive, on-line bzw. in-line Messung der Flockenzerstörung vornehmen können. Hierbei handelt es sich zum einen um ein Laser-Mikroskop, das in-line die mittlere Sehnenlänge der Flocken bestimmen und auch bei hohen Konzentrationen eingesetzt werden kann. Zum anderen gibt es ein Flockungsgradmessgerät (FLG), welches on-line mit Hilfe einer Durchflusszelle und eines Lasers je nach Flockengröße unterschiedliche Transfektionssignale aufzeichnen kann. Allerdings hat dies den Nachteil, dass die Flocken zuerst durch einen Bypass gepumpt und verdünnt werden müssen. Hierbei kann es zu einer Veränderung der Flockengröße kommen. Die Ergebnisse der kommerziellen Messverfahren können mit den klassischen Zählverfahren verglichen und bestätigt werden (Biedermann 1994).

4 Material und Methoden

4.1 Material

Für die in der Arbeit beschriebenen Versuche werden folgende Materialien der verschiedenen Hersteller verwendet.

Tab. 1: Verwendetes Material

Produktbezeichnung	Hersteller
Agar	Oxoid
Sudan Schwarz	Sigma-Aldrich
Sonnenblumenöl	EUCO GmbH
Stärke	Domestic
Calciumchlorid	Bio Chemica
Ascorbinsäure	Merck
Zucker	Nordzucker
Glucosesirup 01444	Cargill
Erdbeeren, tiefgekühlt	Theo Müller Group

Des Weiteren wird folgende Ausstattung eingesetzt.

- Waage (Ablesbarkeit 0,01 g; Wägebereich 4200 g)
- Heizplatte (Einstellung der Geschwindigkeit zwischen 0 und 1500 U/min möglich mit einer Drehzahlgenauigkeit von 2 % und einer Höchsttemperatur von 310 °C)
- Rührer Eurostar (Model: EURO-ST-P-CV, IKA-Werke, 50-2000 U/min)
- Verschiedene Rührorgane
- Magnetrührstäbchen (d:8 mm; l:40 mm)
- Thermometer Testo 925 (Messgenauigkeit: 0,1 °C)
- Bechergläser (1000 ml, 5000 ml)
- Edelstahlplatte (120 cm x 60 cm x 0,2 cm) mit 2 cm hohem Rand
- Teigschneider aus Edelstahl mit 7 Schneidrädchen, Schnittbreite justierbar von 10 bis 120 mm
- Doppelwandiges Edelstahlrohr
- Spritze, 12 ml
- Kunststoffschlauch Ø 6 mm

- Schaumkelle, Suppenkelle, Pfannenwender, Sieb, Trichter
- 10-Liter Eimer

4.1.1 Agar

Agar-Agar ist ein Polysaccharid, welches vorwiegend aus Rotalgen – mit dem botanischen Namen *Gelidium amansii/cartilagineum/carneum/laria* und *Pterocladia pinnata/lucida* – gewonnen wird. Mit Hilfe von Wasser wird der Agar aus den Zellwänden dieser Rotalgen herausgelöst. Agar besteht zu etwa 70 % aus dem gelierenden Inhaltsstoff Agarose und etwa zu 30 % aus dem nicht gelierenden Agaropektin. Es handelt sich hierbei um ein geschmacksneutrales Geliermittel, das vor allem in der vegetarischen Küche bereits Verwendung findet. In Japan ist Agar schon seit dem 17. Jahrhundert als Gelier- und Verdickungsmittel bekannt. Der menschliche Körper kann Agar nicht verwerten, darum zählt Agar laut Definition zu den Ballaststoffen (Lebensmittellexikon 2012).

Agar wird auch häufig in der Mikrobiologie als Nährboden für Mikroorganismen genutzt. Dabei werden bei der Herstellung der Agarlösung z.B. Nährstoffe zugegeben, welche den Mikroorganismen anschließend als Substrat dienen.

4.1.2 Rührbehälter und Rührertypen

Durch die Verwendung eines zylindrischen Rührbehälters sind die Messergebnisse mit denen anderer Arbeiten vergleichbar (Wille 2000). Die Maße des verwendeten Rührbehälters mit Flachboden sind in Abb. 7 bei Einbau des Propellerrührers dargestellt. Hierbei werden folgende Verhältnisse verwendet: $H/D=1$, $h/H=0,3$

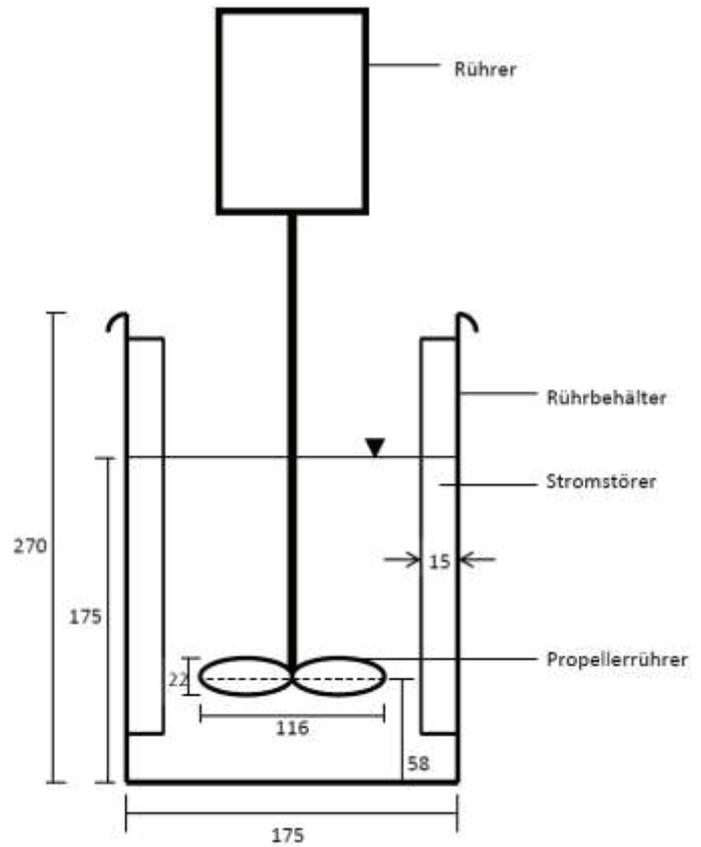


Abb. 7: Bild und schematische Abbildung [mm] des Versuchsstandes am Beispiel des Propellerrührers

Bei den Experimenten werden verschiedene Rührorgane eingesetzt. Dabei handelt es sich sowohl um Axial-, Radial-, als auch um Tangentialrührer, d.h. die Rührer erzeugen unterschiedliche Strömungsfelder (siehe Abb. 1). In Abb. 8 sind die für die Versuche verwendeten Rührer dargestellt.



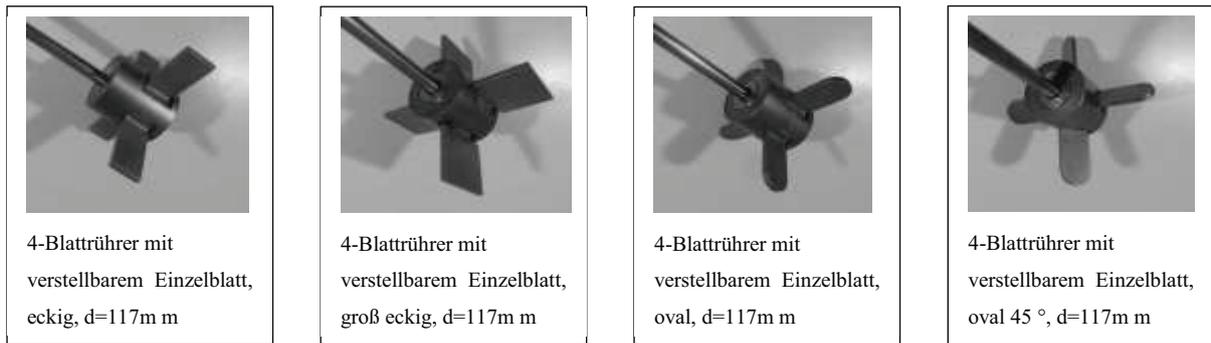


Abb. 8: Bilder der verwendeten Rührer

Insgesamt wurden acht verschiedene Rührer verwendet.

In Tab. 2 sind die Daten der in der Arbeit verwendeten Rührer aufgeführt.

Tab. 2: Daten der verwendeten Rührer

Rührertyp	Durchmesser [mm]	Blattzahl	d/D	h/d	h _B /d	α [°]	Hauptförder- richtung
Blatt	106	1	0,61	0,55	1	-	radial
Blatt	81	1	0,46	0,72	1	-	radial
Propeller	116	3	0,66	0,50	0,17	30 °	axial
Anker	154	1	0,88	0,52	0,94	-	radial/tangential
4-Blatt oval	117	4	0,67	0,50	0,19	-	radial
4-Blatt oval	117	4	0,67	0,50	0,19	45 °	axial
4-Blatt eckig	117	4	0,67	0,50	0,19	-	radial
4-Blatt eckig	117	4	0,67	0,50	0,38	-	radial

Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf den Ankerrührer gelegt, da dieser wandgängig ist und häufig in der Praxis für die Herstellung von Fruchtzubereitungen verwendet wird.

4.1.3 Reynoldszahlen

Die Reynoldszahl beschreibt den Strömungszustand im Rührbehälter und unterscheidet zwischen einer laminaren, einer turbulenten und einer Übergangsströmung. Mit Veränderung der Drehzahl, des Rührerdurchmessers und der Viskosität und Dichte der kontinuierlichen Phase variiert die Reynoldszahl.

Tab. 3: Reynoldszahl der verwendeten Rührorgane für Wasser als kontinuierliche Phase

		Drehzahl [1/min]		
		150	250	350
Rührorgan	d [mm]	Reynoldszahl		
Blattrührer	81	16261	27102	37942
Blattrührer	106	27848	46413	64978
Ankerrührer	154	58779	97964	137150
Propellerrührer	116	33350	55583	77816
4-Blattrührer oval	117	33927	56546	79164
4-Blattrührer eckig	117	33927	56546	79164
4-Blattrührer gr. eckig	117	33927	56546	79164

Die Reynoldszahlen in Tab. 3 zeigen, dass es sich unter der Verwendung von Wasser als kontinuierliche Phase bei allen Rührorganen und allen verwendeten Drehzahlen durchgängig um eine turbulente Strömung handelt. Beim Ankerrührer wird die turbulenteste Strömung erzeugt. In der Praxis wird der Ankerrührer mit einer niedrigeren Drehzahl eingesetzt. Da es sich um einen kleinen Behälter mit hohem Partikelanteil handelt muss eine hohe Drehzahl gewählt werden, damit bei allen Rührern eine turbulente Strömung entsteht. Zudem erfolgt der Vergleich der Rührer über die Drehzahl. Beim Blattrührer (\varnothing 81 mm) wird die geringste Turbulenz erzeugt. In Tab. 4 sind die Reynoldszahlen für die verwendete Glucoselösung dargestellt.

Tab. 4: Reynoldszahl der verwendeten Rührorgane für Glucoselösung als kontinuierliche Phase

		Drehzahl [1/min]		
		150	250	350
Rührorgan	d [mm]	Reynoldszahl		
Blattrührer	106	75	124	174
Ankerrührer	154	157	262	367
Propellerrührer	116	89	149	208

Die Versuche werden nur für den vorwiegend tangential fördernden Ankerrührer, für den axial fördernden Propeller- und für den radial fördernden Blattrührer (\varnothing 106 mm) durchgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Reynoldszahl mit Erhöhung der Viskosität auf ca. 2,5 Pas deutlich kleiner wird. Mit Glucoselösung als kontinuierliche Phase handelt es sich nicht mehr um eine turbulente Strömung sondern um eine Übergangsströmung.

4.1.4 Bewehrung

Stromstörer werden häufig bei turbulenten Strömungen im Rührbehälter eingesetzt. Die Bewehrung ist die Voraussetzung für eine intensive und effektive Prozessführung, da sie eine großräumige, turbulente Zirkulationsströmung und einen intensiven Impulsstromeintrag erzeugt. Durch die Bewehrung des Behälters wird eine Erhöhung der Newtonzahl des Rührers gegenüber dem unbewehrten Zustand bewirkt. Zusätzlich wird eine Trombenbildung unterdrückt und stattdessen eine Oberflächenturbulenz erzeugt. Für Normstromstörer in Rührbehältern mit ebenem Boden gilt: Bodenabstand $H_{Su}/D = 0$ oder $0,25$. (Liepe et al 1998)

Bei den folgenden Versuchen werden jeweils zwei Stromstörer eingesetzt. Lediglich beim Ankerrührer wird nur ein Stromstörer verwendet, da sonst die Rotationsgeschwindigkeit zu hoch ist.

4.2 Methoden

4.2.1 Agarwürfel

In der Mikrobiologie wird in der Regel eine Agarlösung mit einer Konzentration von $c=1,5\%$ hergestellt. Da es sich hierbei um sehr feste Nährböden handelt, welche die Festigkeit von Frucht- und Gemüsewürfeln übersteigen, werden für die folgenden Rührversuche Agarlösungen mit einer geringeren Konzentration ($c=0,8\%$, $c=1,0\%$ und $c=1,2\%$) hergestellt. Tab. 5 enthält die Rezeptur der Agarlösung.

Tab. 5: Rezeptur der Agarlösung

Agarkonzentration	0,8 %	1,0 %	1,2 %
Wasser	7920 g	7904 g	7888 g
Agar	64 g	80 g	96 g
Sudan Black	16 g	16 g	16 g

Für die Herstellung der Agarlösung wird das Wasser mit dem Magnetrührer in einem 5-Liter-Becherglas erhitzt. Während des Erhitzungsvorganges wird der Agar mit schwarzer Farbe (Sudan Black) abgewogen, gemischt und langsam in das warme Wasser gegeben. Das Gemisch wird unter ständigem Rühren auf 95 °C erhitzt. Die Abdeckung des Becherglases mit Alufolie schützt das Gemisch vor Verdampfen des Wassers und ermöglicht die Erhaltung der Konzentration der Agarlösung. Nach einer Heißhaltezeit von zwei Minuten, wird das Gemisch im Wasserbad auf ca. 55 °C abgekühlt. Anschließend wird die Lösung auf eine Edelstahlplatte mit Rand gegossen und kühlt dort ab. Abb. 9 zeigt die bereits abgekühlte Agarplatte.



Abb. 9: Agarplatte nach dem Gießen und Abkühlen

Mithilfe eines Winkels und eines Teigschneiders wird der Agar nun manuell in Würfel geschnitten. Dabei wird die Agarplatte zuerst quer und dann längs geschnitten. In Abb. 10 ist der Schneidvorgang der Agarplatte dargestellt. Der Teigschneider muss langsam durch den Agar geführt werden, damit der Agar nicht schon beim Schneiden beschädigt wird und scharfe Kanten entstehen.

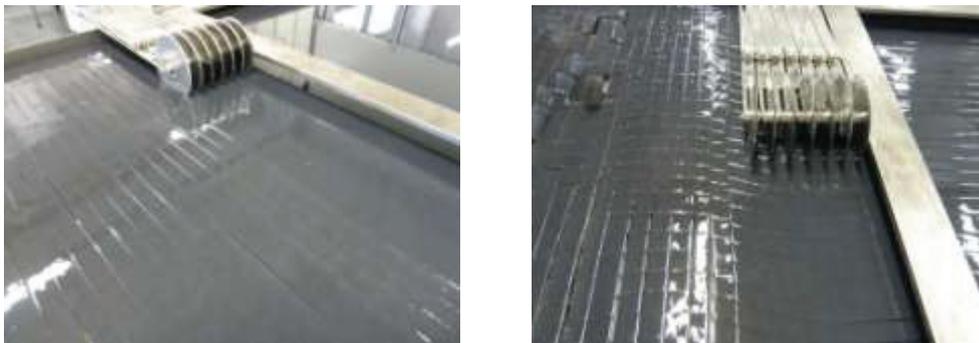


Abb. 10: Herstellen der Agarwürfel mit einem Teigschneider

Die Würfel werden nun durch einen Edelstahlpfannenwender vorsichtig von der Edelstahlplatte gehoben und in einen 10-Liter Eimer, welcher bis zur Hälfte kaltes Wasser enthält, gefüllt. Die Agarwürfel werden bis zu ihrer Verwendung bei 8 °C im Kühlraum gelagert.

4.2.2 Agarkugeln

Die Agarlösung wird zunächst, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, zubereitet und auf ca. 55 °C abgekühlt. Das Öl, welches sich im Rohr befindet, wird durch einen Kühler auf 2 °C heruntergekühlt. Abb. 11 zeigt den Versuchsstand zur Herstellung der Agarkugeln. Es handelt sich um ein doppelwandiges Rohr, das durch eine Kühlflüssigkeit gekühlt werden kann. Auf dem Rohr ist

zusätzlich noch ein Sichtfenster angebracht, wodurch eine gezielte Kugelherstellung ermöglicht wird.

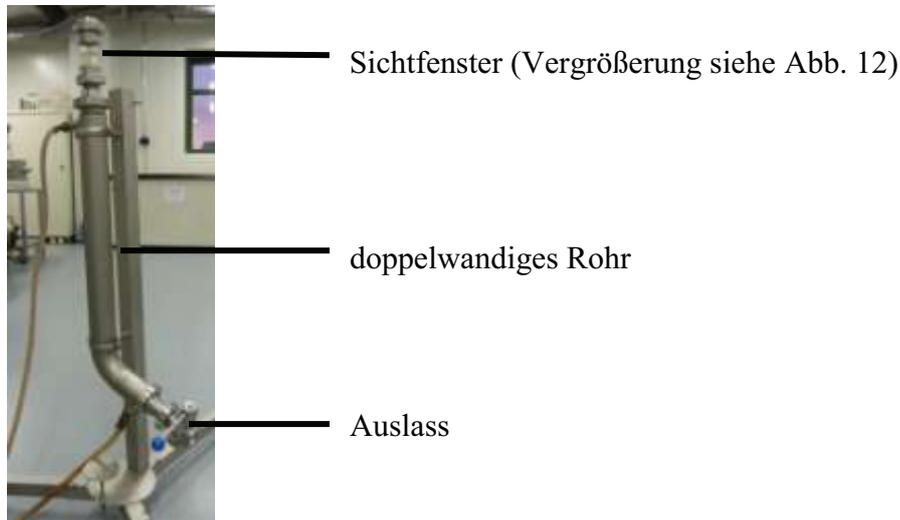


Abb. 11: Versuchstand für die Herstellung der Agarkugeln

Der Agar wird in einer Spritze aufgezogen, die durch einen kurzen Schlauch verlängert wird. Anschließend wird der Schlauch soweit in das Öl getaucht, dass das Ende des Schlauches im Sichtfenster zu sehen ist. Durch leichtes Drücken auf die Spritze entstehen Tropfen im Sichtfenster, welche beim Lösen vom Ende des Schlauches zu Kugeln werden. Die Kugeln aus Agar wandern, aufgrund der kleineren Dichte des Öls, durch das Rohr nach unten. Auf ihrem Weg durch das Rohr erhärten sie durch das gekühlte Öl. Nachdem die Kugeln das untere Ende des Rohres erreicht haben, wird der Auslass geöffnet und das Öl mit den Kugeln in einem Eimers aufgefangen. Das Öl wird mit Hilfe eines Trichters wieder in die Vorrichtung zurückgeführt und die Kugeln hierbei abgesiebt. Wichtig ist, dass die Anzahl der Kugeln im Rohr nicht zu groß ist und diese zeitnah aus dem Rohr entnommen werden. Die Agarkugeln härten auf ihrem Weg durch das Rohr nicht vollständig aus, sodass sich Druckstellen bilden können, wenn mehrere Kugeln aufeinander liegen. Diese könnten zu einer Beeinträchtigung der Messergebnisse führen.



Abb. 12: Herstellung der Agarkugeln

In Abb. 12 ist die Herstellung der Agarkugeln dargestellt. Das Ablösen des Agartropfens und somit die „Entstehung“ der Agarkugel ist hier deutlich zu erkennen. Auf dem rechten Bild sind die ausgehärteten Agarkugeln abgebildet. Nach dem Aushärten werden Agarkugeln mit einem Durchmesser kleiner oder größer 10 mm aussortiert.

4.2.3 Textur der Agarwürfel

Um die Textur in Abhängigkeit von der Größe und Konzentration der Agarwürfel und –kugeln zu ermitteln, wird sie mit dem Winopal Textur Analysers TA-XT2 untersucht. Abb. 13 zeigt die Prüfgeometrie des Textur Analysers.

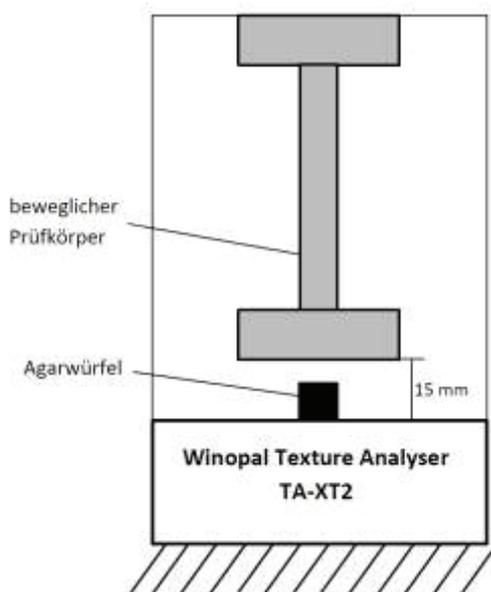


Abb. 13: Prüfgeometrie des Winopal Texture Analysers zur Charakterisierung stückiger Güter

Die Würfel bzw. Kugeln werden einzeln auf den unteren ruhenden Prüfkörper gelegt. Der Abstand der Prüfkörper beträgt 15 mm. Der obere Prüfkörper (5 cm Platte) wird nun mit einer Geschwindigkeit von 1,2 mm/s abgesenkt. Die Messung beginnt, wenn der obere Prüfkörper auf die Probe trifft. Der Prüfweg beträgt ab diesem Augenblick 80 %. Der Textur Analyser zeichnet den Weg (mm) und die Kraft (N) auf. Dabei ist vor allem die Normalspannung beim Aufbrechen der Agarwürfel von Bedeutung. Um ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten, werden von jeder Konzentration jeweils zehn Proben verwendet.

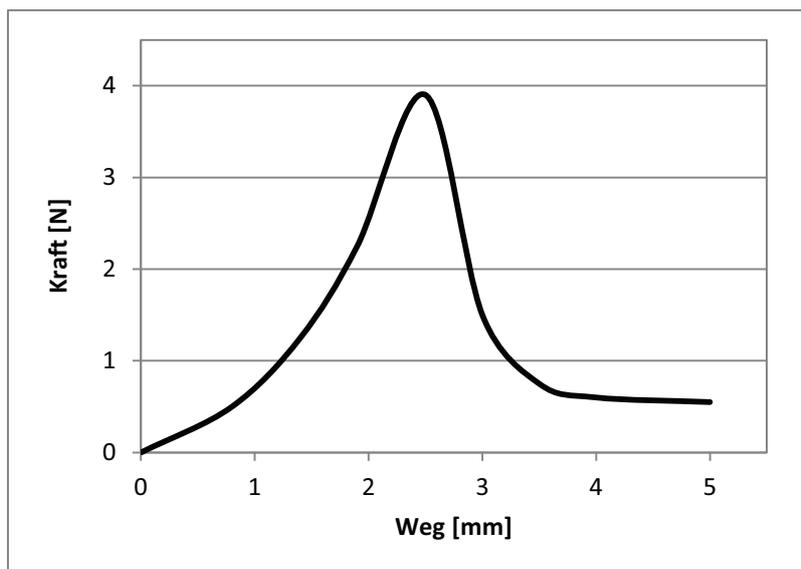


Abb. 14: Kraft-Weg-Diagramm für einen Agarwürfel $c=1,0\%$

Abb. 14 zeigt exemplarisch ein Kraft-Weg Diagramm für Agarwürfel $c=1,0\%$. Am Höhepunkt des Peaks kommt es zum Aufbruch der Agarwürfel. Durch die maximale Kraft lässt sich die Festigkeit der Agarwürfel bestimmen. Die Abmessungen der Agarwürfel betragen $10 \times 10 \times 10$ mm. Anhand der Oberfläche der Agarwürfel und der maximalen Kraft wird die Normalspannung berechnet.

4.2.4 Rühren Hauptversuche

Die Hauptrührversuche zur Scherbeanspruchung werden im Rührbehälter (Volumen $V=5$ l, Behälterdurchmesser $D=175$ mm, Bewehrung: zwei Stromstörer) unter Einsatz von Wasser durchgeführt. Für die Rührversuche werden verschiedene Rührorgane verwendet, um den Einfluss der Rührorgane auf die Beschädigung der Agarwürfel zu untersuchen. Um Beschädigungen der empfindlichen Agarwürfel vor Versuchsbeginn zu vermeiden, werden zunächst 2000 g Agarwürfel abgewogen und mit 1500 g Wasser aufgegossen. Das Gemenge wird in den Rührbehälter

(5-Liter Becherglas) gegeben und die restlichen 500 g Wasser hinzugefügt. Das Agarwürfel-Wasser-Gemisch wird nun für eine bestimmte Zeit gerührt. Bei den Standardversuchen beträgt die Rührzeit 1, 5, 10 und 20 Minuten. Nachdem der Rührvorgang beendet ist, wird eine Stichprobe von ca. 150 g Agarwürfeln entnommen und optisch auf ihre Beschädigung untersucht. Dabei gibt es verschiedene Kategorien, in welche die Agarwürfel je nach Grad ihrer Beschädigung eingeordnet werden. Der prozentuale Anteil der Beschädigungen macht einen Vergleich zwischen den einzelnen Rührorganen in Abhängigkeit von der Rührzeit, Viskosität der kontinuierlichen Phase und dem Anteil und der Konzentration der Agarwürfel möglich.

4.2.5 Einfluss der Blattgeometrie

Um einen direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Blattgeometrien zu ermöglichen, wird ein Rührer mit verstell- und auswechselbaren Rührblättern verwendet. Die Blattgeometrien repräsentierten die wesentlichen Parameter Blattgröße, Blatthöhe, Anstellwinkel und Kantigkeit der Außenkontur. Als Rührblatt wird zum einen eine rechteckige Geometrie mit der Blattlänge $l_B=38,5$ mm und der Blatthöhe $h_B=22$ mm eingesetzt. Daneben wird eine Geometrie mit gleicher Blattlänge und doppelter Blatthöhe $l_B=44$ mm benutzt. Das dritte Rührblatt hat eine äußere Kante die die Kontur eines Halbkreises aufweist. Die Blattlänge ist $l_B=38,5$ mm und die Blatthöhe ist erneut $h_B=22$ mm.



Abb. 15: Rührblätter des modifizierbaren Rührorgans

Abb. 15 zeigt die einzelnen Rührblätter des modifizierbaren Rührorgans. Bei Bedarf können die nicht belegten Sacklöcher mit einer Kunststoffscheibe verschlossen und somit die Blattzahl verringert werden. Die maximale Blattzahl beträgt vier Rührblätter.

4.2.6 Kritische Schubspannung

Um die kritische Schubspannung der einzelnen Rührorgane zu erfassen, wird eine sogenannte Grenzdrehzahl ermittelt. Die Grenzdrehzahl ist die Drehzahl, die erstmalig zu einer Zerstörung der Partikel führt. Hierfür wird ein Standardversuch vorbereitet, d.h. es werden 2000 g Agarwürfel ($c=1,0\%$) auf 2000 g Wasser in ein 5-Liter-Becherglas eingewogen. Begonnen wird mit der für den Rührer niedrigsten möglichen Drehzahl (50 U/min); die Zeitintervalle bei jeweils konstanter Drehzahl betragen zwei Minuten. Nach dem Ablauf der zwei Minuten wird der Versuch gestoppt und eine optische Auswertung der Agarwürfel durchgeführt. Weisen die Agarwürfel keinerlei Beschädigung auf, so wird die Drehzahl um 25 U/min erhöht und das nächste Zeitintervall gestartet. Dieser Versuch wird solange durchgeführt, bis die Agarwürfel die ersten Beschädigungen (abgebrochene Ecken) aufweisen.

4.2.7 Viskosität der kontinuierlichen Phase

Um den Einfluss der Viskosität der kontinuierlichen Phase auf die Beschädigung der Agarwürfel während des Rührprozesses zu bestimmen, wird eine kontinuierliche Phase mit anderer Viskosität eingesetzt. Die Hauptversuche werden mit Wasser durchgeführt. Die Viskosität der kontinuierlichen Phase für die Viskositätsversuche soll an die einer realen Fruchtzubereitung angepasst werden. In Tab. 6 ist die Rezeptur einer Standardfruchtzubereitung aufgeführt. Exemplarisch wird sie mit Tiefkühlerdbeeren hergestellt.

Tab. 6: Rezeptur einer Standardfruchtzubereitung (DIL)

Zutat	Einwaage [%]
Wasser	29,34
Erdbeeren	50,00
Kristallzucker	17,34
Stärke	2,80
Calciumchlorid	0,22
Vitamin C	0,30

Die Viskosität der kontinuierlichen Phase der Fruchtzubereitung wird bei 20 °C und bei 90 °C gemessen. Da es sich bei der Stärkelösung um ein nicht newtonsches Fluid handelt, ist die Viskosität von der Schergeschwindigkeit abhängig. Für die Versuche mit erhöhter Viskosität wird Glucosesirup verwendet, da es sich hierbei um ein newtonsches Fluid handelt und somit die Vis-

kosität trotz zunehmender Schergeschwindigkeit konstant bleibt. Hierfür werden Proben aus Glucosesirup und Wasser hergestellt und auf ihre Viskosität untersucht. Die Glucoselösungen haben verschiedene Trockensubstanzen (TS): 41,67 %, 50,00 %, 58,33 %, 66,67 % und 75,00 %.

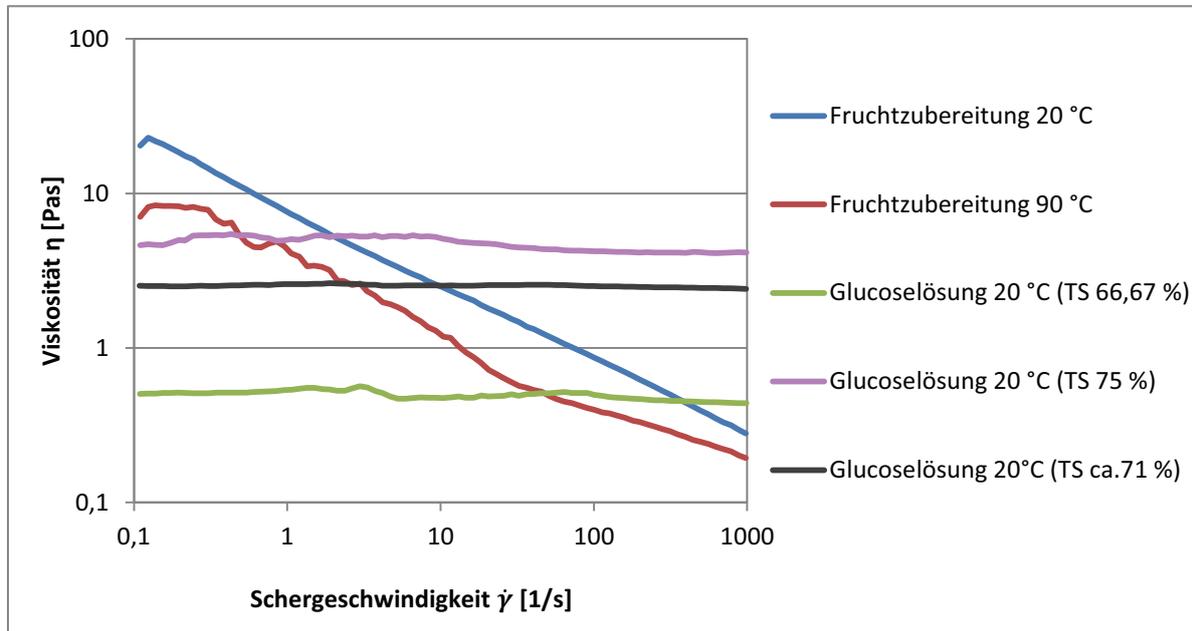


Abb. 16: Viskositätsfunktion der kontinuierlichen Phase

Abb. 16 zeigt die Viskosität der verschiedenen Proben in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit. Es wird deutlich, dass die Viskosität der Fruchtzubereitung auch von der Temperatur abhängig ist. Der Mittelwert der Fruchtzubereitung bei 20 °C beträgt ca. 5 Pas, bei 90 °C ca. 2,5 Pas. Für die Rührversuche soll die Viskosität der kontinuierlichen Phase ca. 2,5 Pas betragen, um die Viskosität einer Fruchtzubereitung während des Kochvorgangs zu simulieren. Die Glucoselösung mit einer Trockensubstanz von 66,67 % hat eine Viskosität von ca. 0,5 Pas. Dagegen hat die Glucoselösung mit einer Trockensubstanz von 75 % eine Viskosität von ca. 4,5 Pas. Um eine Viskosität der kontinuierlichen Phase von ca. 2,5 Pas zu erhalten, wird die Trockensubstanz auf ca. 71 % eingestellt und die Viskosität anschließend erneut gemessen. In Abb. 16 ist das Ergebnis der Viskositätsmessung für die Glucoselösung mit einer Trockensubstanz von ca. 71 % dargestellt.

4.2.8 Optische Auswertung der Agarwürfel

Nachdem die Agarwürfel unter bestimmten Bedingungen im Rührbehälter gerührt wurden, erfolgt eine rein optische Auswertung der Beschädigung der Agarwürfel. Hierbei werden ca. 150 g Agarwürfel aus dem Rührbehälter entnommen. Dabei ist darauf zu achten, dass es sich um eine

repräsentative Probe handelt. Die Entnahme der Probe sollte direkt nach dem Rührvorgang erfolgen, sodass sich die Agarwürfel nicht absetzen und es evtl. zu einer Entmischung der verschiedenen Beschädigungsgrade kommen kann. Als Entnahmewerkzeug wird ein feines Sieb verwendet, damit auch der Agarschlamm aufgefangen und ausgewertet werden kann. Des Weiteren muss dafür gesorgt werden, dass es durch die Probenahme nicht zu einer zusätzlichen Beschädigung der Agarwürfel kommt, und die Messergebnisse dadurch verfälscht werden. Die Agarwürfel werden auf einem weißen Hintergrund ausgebreitet und je nach Grad ihrer Beschädigung sortiert. Es werden gemäß Abb. 17 die folgenden fünf Kategorien unterschieden: unbeschädigte Würfel (A), ganze Würfel mit abgerundeten Kanten (B), Würfel mit abgebrochenen Ecken (C), kleine Agarstücke (D) und Agarschlamm (E).



Abb. 17: Kategorien der Agarwürfel nach der Scherbeanspruchung

Beim sogenannten Agarschlamm handelt es sich um ein Agar-Wasser-Gemisch, in welchem durch Ertasten keine feste Struktur mehr erkennbar ist. Nachdem die Agarwürfel in die fünf verschiedenen Kategorien eingeordnet wurden, werden die einzelnen Kategorien gewogen. Dadurch lässt sich ein prozentualer Anteil der Kategorien bestimmen.

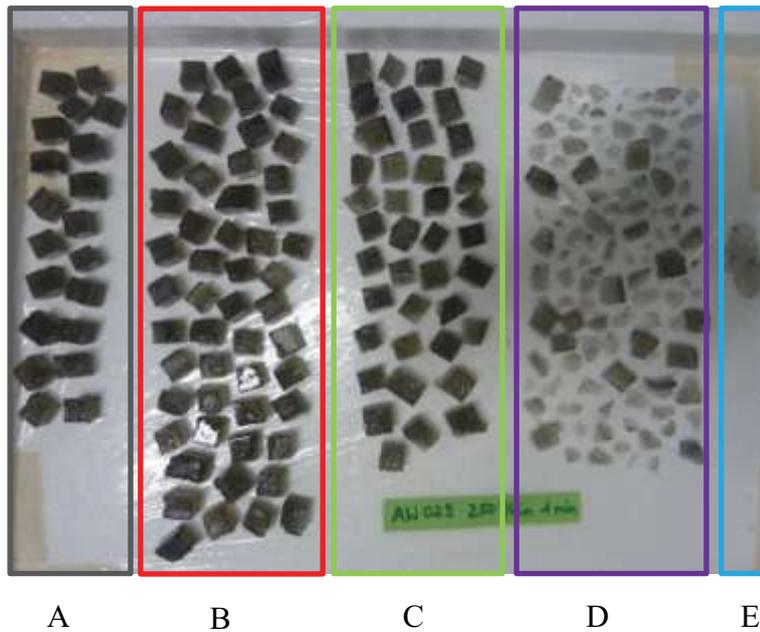


Abb. 18: Fraktionen der Agarwürfel nach dem Grad ihrer Beschädigung

Abb. 18 zeigt die Agarwürfel, die anhand der optischen Begutachtung in die entsprechenden fünf Kategorien eingeteilt werden. Jeder Versuch wird nach diesem festgelegten System ausgewertet. Sollte eine Kategorie aufgrund einer starken bzw. geringen Beschädigung nicht vorhanden sein, dann wird anstelle der Agarwürfel eine Spalte an der entsprechenden Stelle freigehalten. Somit können die unterschiedlichen Bilder schnell und einfach ausgewertet werden.

In einigen nachfolgenden Versuchen werden übersichtlicher Weise die Kategorien zusammengefasst. Hierbei bilden die unbeschädigten Würfel (Kategorie A) und die ganzen Würfel mit abgerundeten Ecken (Kategorie B) die Einheit „unbeschädigte Partikel“. Der Grund hierfür ist, dass es sich bei den abgerundeten Würfeln nicht um eine Beschädigung in diesem Sinne handelt. Es wurde keine Zerstörung der Partikel bewirkt, sondern lediglich die Kanten abgerundet. Des Weiteren bilden die Würfel mit abgebrochenen Ecken (Kategorie C), die kleinen Agarstücke (Kategorie D) und der Agarschlamm (Kategorie E) die Einheit „beschädigte Partikel“. Durch das Zusammenfassen der Kategorien zu Einheiten wird der Vergleich zwischen den verschiedenen Versuchen mit unterschiedlichen Rührorganen vereinfacht.

5 Ergebnisse

5.1 Textur der Agarwürfel

Bevor die eigentlichen Versuche durchgeführt werden können, muss die maximal zulässige Beanspruchung des zu verarbeitenden Stoffsystems bestimmt werden. Hierzu wird die Textur von verschiedenen, aufgetauten Fruchtwürfeln mithilfe des Texture Analysers untersucht. Als Referenzsystem für die Fruchtwürfel werden Agarwürfel verwendet. Diese werden mit den Konzentrationen $c=0,8\%$, $c=1,0\%$ und $c=1,2\%$ hergestellt und die Textur untersucht. Das Ziel ist, die Textur der Agarwürfel an die Textur der aufgetauten Fruchtwürfel anzupassen. Somit können die Versuche unter Ausschluss von Schwankungen der Stoffwerte durchgeführt werden. Abb. 19 stellt die Normalspannung beim Aufbrechen der Agar- und Fruchtwürfel dar.

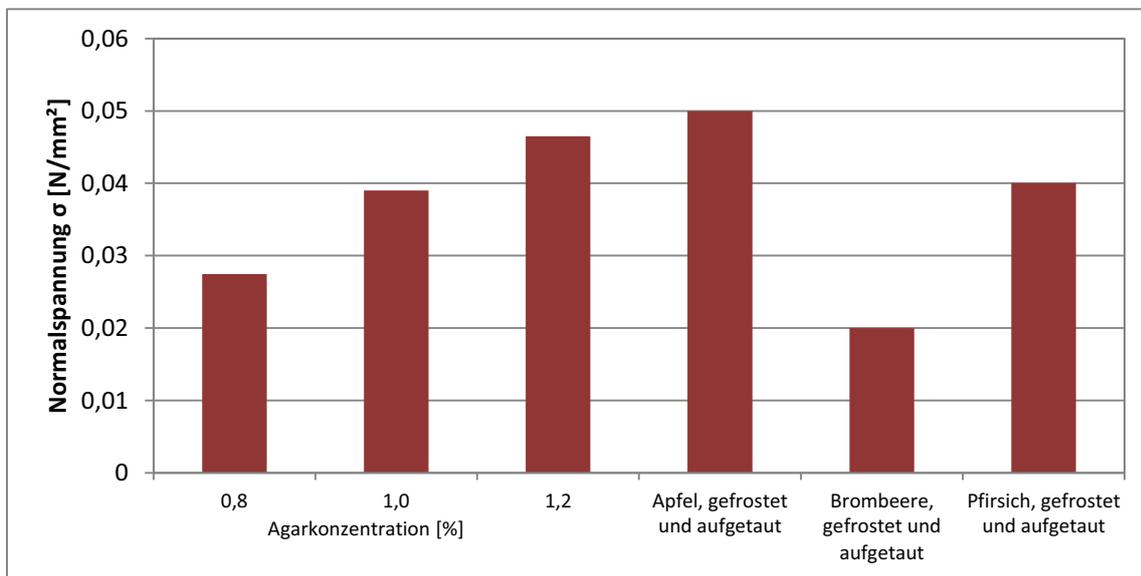


Abb. 19: Normalspannung beim Aufbrechen der Agar- und Fruchtwürfel (jeweils mit Kantenlänge 10 mm)

Aus Abb. 19 geht hervor, dass mit steigender Konzentration der Agarwürfel die Normalspannung größer wird. Der Anstieg der Normalspannung der Agarwürfel ist nahezu proportional zum Anstieg der Konzentration. Vergleicht man die Normalspannung der Agarwürfel mit der Spannung der Fruchtwürfel, dann lässt sich feststellen, dass die drei gewählten Konzentrationen der Agarwürfel die Festigkeit der aufgetauten Fruchtwürfel sehr gut abdecken. Allgemein wird festgestellt, dass die Normalspannungen σ für Frucht- und Agarwürfel sehr klein sind und es sich somit um sehr scherempfindliche Stoffsysteme handelt. Für die folgenden Rührversuche eignen sich dementsprechend alle drei gewählten Konzentrationen. Aufgrund dieses Ergebnisses werden für die Hauptversuche Agarwürfel mit einer Konzentration von $c=1,0\%$ gewählt, da sie einen

guten Mittelwert der gemessenen Schubspannung haben. Die Konzentrationen $c=0,8\%$ und $c=1,2\%$ werden nur für einzelne Standardversuche eingesetzt, um den Einfluss der unterschiedlichen Konzentrationen auf die Beschädigung der Agarwürfel zu verdeutlichen.

5.2 Charakterisierung der Rührorgane bei gleichen Bedingungen

Zur Charakterisierung der einzelnen Rührorgane, werden für jedes Rührorgan Versuche zu gleichen Bedingungen durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Beanspruchung der Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit dargestellt. Die Drehzahl beträgt bei allen Versuchen 250 U/min, die Konzentration des Agars $c=1,0\%$ und die kontinuierliche Phase besteht aus Wasser.

Henzler & Biedermann (1996) und Hoffmann et al. (1992) verglichen die Beanspruchung von Tonmineral-Flocken durch unterschiedliche Rührertypen und -geometrien bei gleicher Drehzahl und stellten fest, dass axial fördernde Rührer wie der Propellerrührer wegen der hohen lokalen Energiedissipationsraten eine besonders große Beanspruchung verursacht. Beim Vergleich der verschiedenen Rührer wird nun entsprechend auch erwartet, dass der Propellerrührer, im Gegensatz zu den anderen Rührern, eine größere Beanspruchung der Partikel verursacht. Für den Ankerrührer wird die größte Beanspruchung der Partikel erwartet, da dieser mit 1,5 m/s (bei einer Drehzahl von 250 U/min) die größte Umfangsgeschwindigkeit aufweist. Zudem beträgt die Reynoldszahl für den Ankerrührer bei 250 U/min bereits 97.964. Der kleine Blattrührer, mit einem Durchmesser von 81 mm, hingegen hat bei gleicher Drehzahl nur eine Umfangsgeschwindigkeit von 1,05 m/s. Für die beiden Blattrührer wird erwartet, dass der kleine Blattrührer, mit einem Durchmesser von 81 mm, zu einer geringeren Beanspruchung der Partikel führt, da dieser eine niedrigere Umfangsgeschwindigkeit aufweist als der große Blattrührer, mit einem Durchmesser von 106 mm.

Abb. 20 stellt die prozentualen Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit für den vorwiegend tangential fördernden Ankerrührer dar.

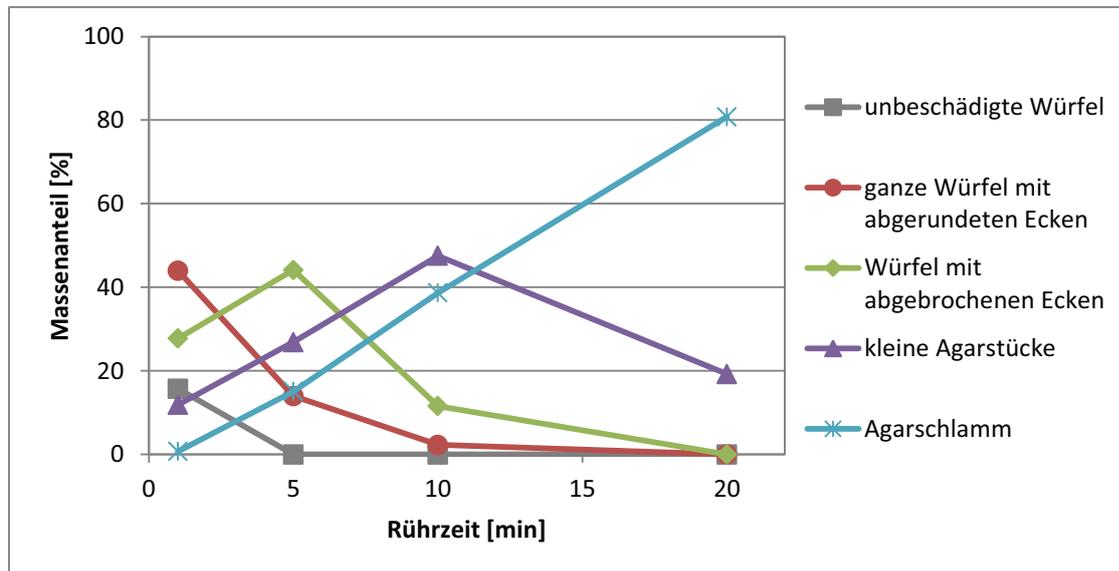


Abb. 20: Ankerrührer - Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Nach einer Rührzeit von einer Minute sind bereits nur noch 15,70 % unbeschädigte Würfel (Kategorie A) vorhanden. Den größten Anteil mit 43,98 % haben die ganzen Würfel mit abgerundeten Ecken (Kategorie B). Die Würfel mit abgebrochenen Ecken (Kategorie C) haben einen Anteil von 27,74 %. Einen relativ kleinen Anteil haben die kleinen Agarstücke (Kategorie D) mit 11,87 %. Den kleinsten Anteil mit 0,71 % hat der Agarschlamm (Kategorie E).

Nach einer Rührzeit von fünf Minuten ändert sich die Verteilung der Agarwürfel in den Kategorien drastisch. Es sind keine unbeschädigten Würfel mehr vorhanden und auch der Anteil der ganzen Würfel mit abgerundeten Ecken sinkt auf 13,98 %. Die ehemals unbeschädigten Partikel werden nun ebenfalls beschädigt und der Anteil an Würfeln mit abgebrochenen Ecken steigt deshalb auf 44,11 % an. Der Anteil an kleinen Agarstücken steigt auf 26,86 % und der Anteil an Agarschlamm steigt auf 15,05 % an.

Nach einer Rührzeit von zehn Minuten sind noch 2,26 % Agarwürfel der Einheit „unbeschädigte Partikel“ (Kategorie A und B) vorhanden. Auch die Agarwürfel mit abgebrochenen Ecken nehmen jetzt ab und sind nur noch mit 11,57 % vertreten. Die restlichen 86,17 % der beschädigten Partikel verteilen sich auf die Kategorien D und E.

Nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind nur noch Partikel der Gruppe kleine Agarstücke und Agarschlamm (Kategorie D und E) vorhanden. Der Anteil an kleinen Agarstücken (Kategorie D) ist auf 19,22 % gesunken. Im Gegensatz dazu ist der Anteil an Agarschlamm (Kategorie E)

auf 80,78 % gestiegen. Um das Ergebnis zusätzlich zu verdeutlichen, sind in Abb. 21 die Bilder der Kategorien des Rührversuchs mit dem Ankerrührer dargestellt. Die Agarwürfel wurden jeweils anhand ihres Beschädigungsgrades in die fünf festgelegten Kategorien (von links nach rechts) sortiert.

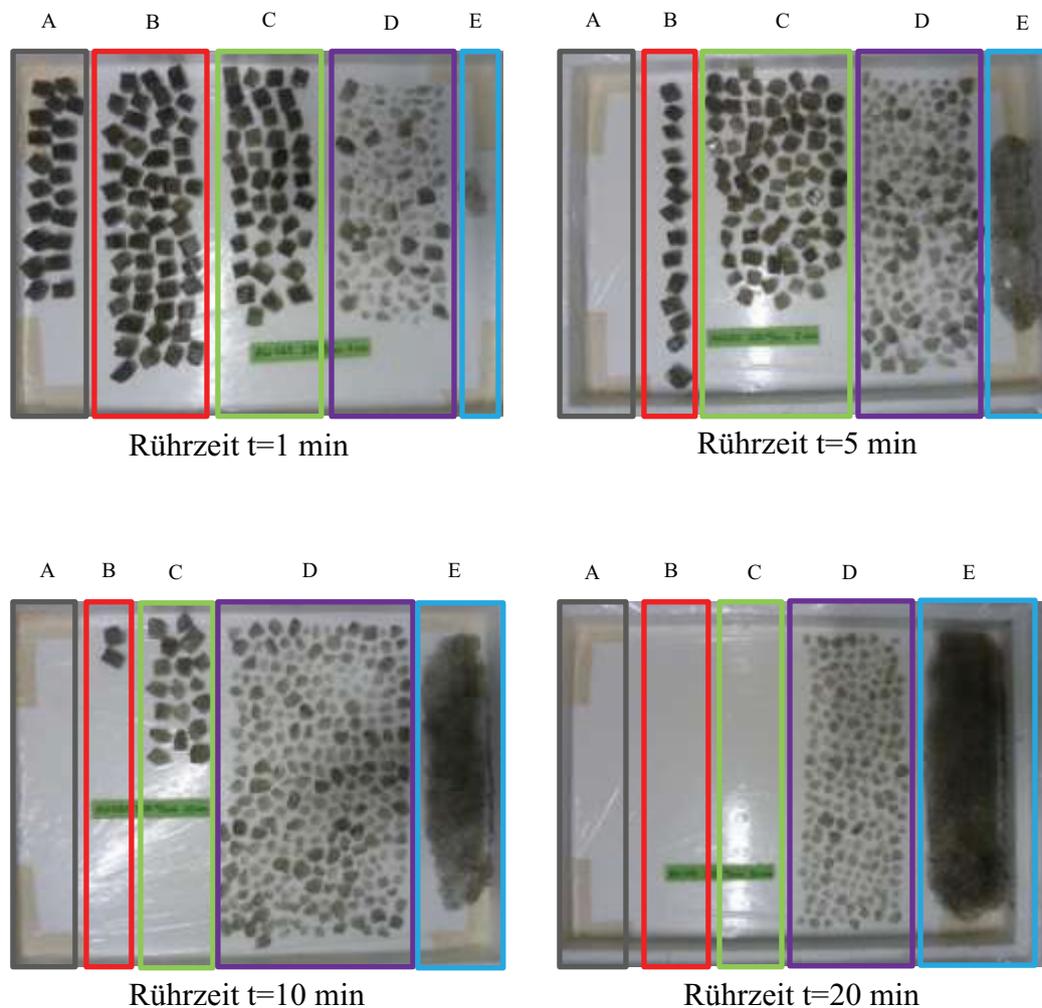


Abb. 21: Ankerrührer - Anteile der Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit

Der Rückgang der unbeschädigten und der Würfel mit abgerundeten Ecken (Kategorie A und B) ist deutlich zu erkennen. Gleichzeitig nimmt die Fraktion der beschädigten Würfel (Kategorie C, D und E) stetig zu. Nach 20 Minuten sind nur noch Kategorie D und E vertreten.

Nachdem die Ergebnisse für den tangential fördernden Ankerrührer aufgeführt wurden, werden nun die Auswirkungen der radialfördernden Rührer betrachtet. Zu den radial fördernden Rührern zählen die unterschiedlich großen Blattrührer und die 4-Blattrührer mit austauschbaren, aber nicht angestellten Rührblättern. Zunächst werden die beiden Blattrührer mit unterschiedlich

großen Blattflächen vorgestellt. Die genaue Charakterisierung der 4-Blattrührer erfolgt in Kapitel 5.2.1. Für den Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm wird erwartet, dass er durch seine hohe Umfangsgeschwindigkeit zu einer starken Beanspruchung der Partikel führt. In Abb. 22 sind die Ergebnisse für den Blattrührer aufgeführt.

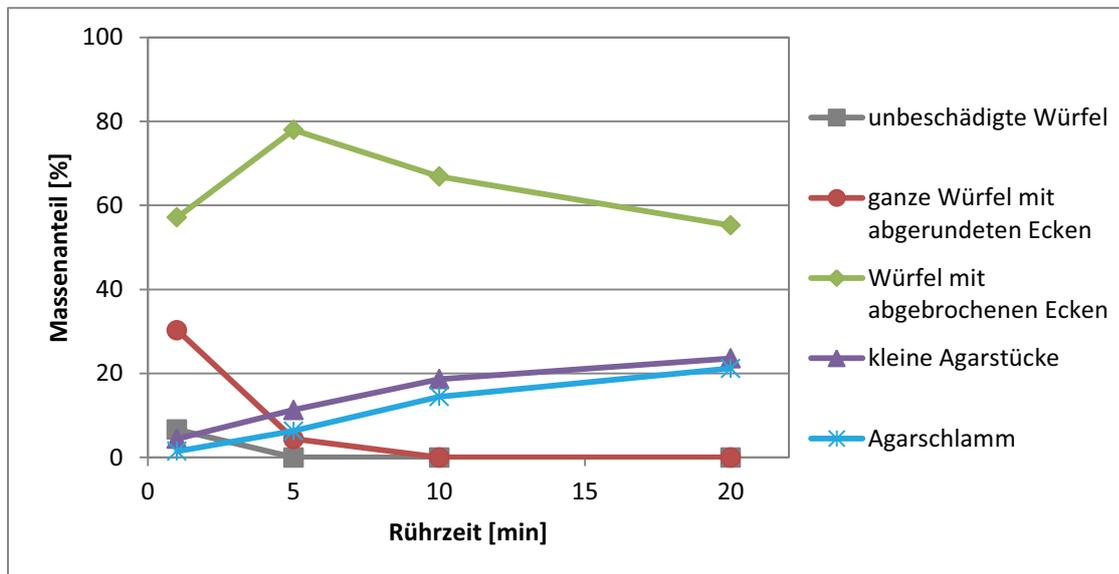


Abb. 22: Blattrührer \varnothing 106 mm – Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Wie auch beim Ankerrührer werden die prozentualen Anteile in Abhängigkeit von der Rührzeit dargestellt. Die Partikel werden hier zunächst stärker beansprucht, als beim Ankerrührer. Nach einer Rührzeit von einer Minute, sind nur noch 6,64 % unbeschädigte Würfel und 30,29 % ganze Würfel mit abgerundeten Ecken vorhanden. Im Gegensatz dazu sind mit 57,17 % auffällig viele Würfel mit abgebrochenen Ecken zugegen. Der Anteil an kleinen Agarstücken und Agarschlamm beträgt zusammen 5,90 %.

Nach fünf Minuten Rührzeit nimmt der Anteil an Würfeln mit abgebrochenen Ecken auf 77,95 % zu. Dies ist eine Folge davon, dass der Anteil an unbeschädigten Würfeln und Würfeln mit abgerundeten Ecken auf 4,41 % sinkt. Der Anteil an Agarstücken und Agarschlamm steigt auf 17,64 % an.

Mit Zunahme der Rührzeit auf 10 und 20 Minuten bleibt die Anzahl an Würfeln mit abgebrochenen Ecken vergleichsweise stabil. Dafür steigt der Anteil an Agarstücken und Agarschlamm, Würfel mit abgerundeten Ecken sind keine mehr vorhanden. Dieser Vorgang ist allerdings viel langsamer, als beim Ankerrührer. Für den Blattrührer mit einem Durchmesser von 81 mm wird eine kleinere Zerstörung erwartet, als für den Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm,

da dieser eine geringere Umfangsgeschwindigkeit bei gleicher Drehzahl aufweist. In Abb. 23 sind die Ergebnisse für den Blattrührer (\varnothing 81 mm) dargestellt.

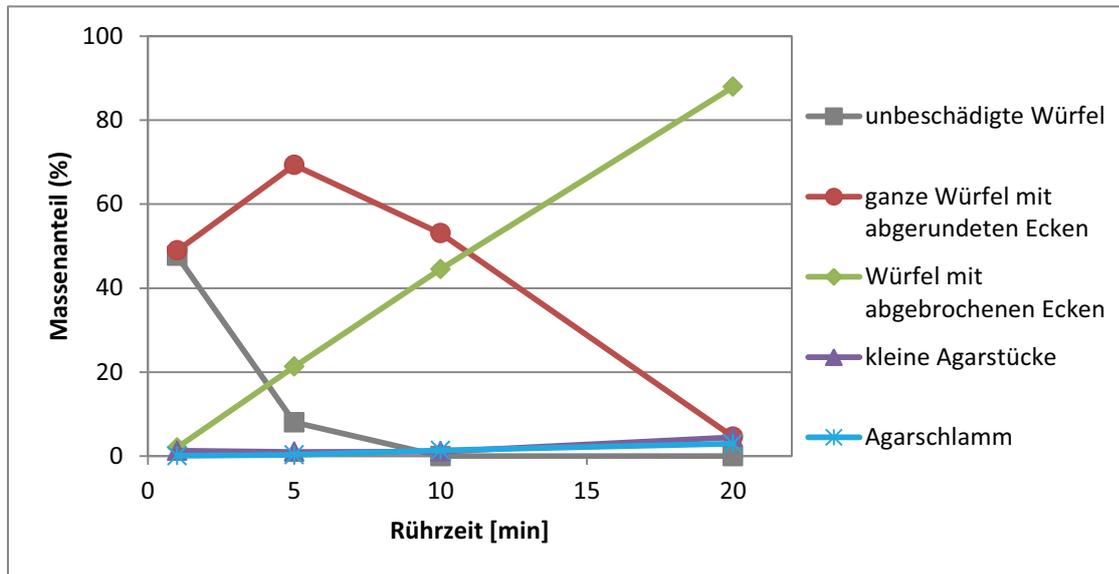


Abb. 23: Blattrührer \varnothing 81 mm - Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Zu Beginn des Versuches, nach einer Rührzeit von einer Minute, sind noch 47,64 % der Agarwürfel komplett unbeschädigt. 48,95 % der Agarwürfel haben lediglich abgerundete Ecken. Somit liegt der Anteil der beschädigten Partikel bei 3,40 %. Nach fünf Minuten steigt die Anzahl der ganzen Würfel mit abgerundeten Ecken, was wiederum durch den Abfall der unbeschädigten Würfel hervorgerufen wird. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Würfel mit abgebrochenen Ecken. Nach 20 Minuten Rührzeit sind keine unbeschädigten Würfel und nur noch 4,59 % der Würfel mit abgerundeten Ecken vorhanden. Bemerkenswert ist jedoch, dass der Anteil an Agarstücken und Agarschlamm selbst nach 20 Minuten Rührzeit nur 7,48 % beträgt. Als Zwischenergebnis kann festgehalten werden, dass der kleine Blattrührer, mit einem Durchmesser von 81 mm, bei einem Vergleich über die Drehzahl schonender ist als der große Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm.

Als nächstes wird der axial fördernde Propellerrührer vorgestellt. Für ihn wird bei einem Vergleich über die Drehzahl eine geringe Beanspruchung der Partikel erwartet. In Abb. 24 werden die Ergebnisse für den axial fördernden Propellerrührer dargestellt.

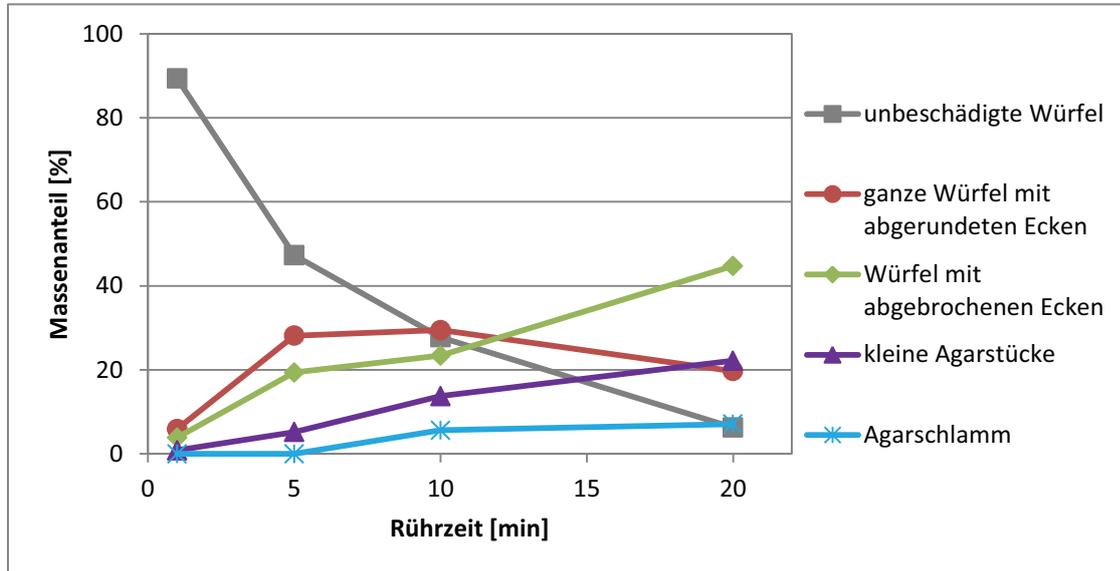


Abb. 24: Propellerrührer - Prozentuale Anteile in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Auffällig ist, dass nach einer Minute Rührzeit noch 89,34% unbeschädigte Würfel im Rührbehälter vorliegen. Der Anteil an unbeschädigten Würfeln nimmt, bezogen auf die Rührzeit, näherungsweise linear ab. Selbst nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind noch 6,27 % unbeschädigte Würfel (Kategorie A) vorhanden. Die Anteile der Kategorie C, D und E nehmen hingegen nahezu linear zu. Selbst nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind nur 7,12 % Agarschlamm im Rührbehälter. Eine Erklärung für die sehr langsame Zerstörung der Agarwürfel könnte sein, dass bei 250 U/min keine homogene Strömung im Rührbehälter vorliegt. Damit der Rührer das Strömungsfeld generieren kann, muss die Drehzahl erhöht werden.

Um die unterschiedliche Beanspruchung der Partikel durch die verschiedenen Rührertypen zu verdeutlichen, sind in der nachfolgenden Abbildung die beschädigten Partikel (Kategorie A und B) der einzelnen Rührer dargestellt. Die Einzelergebnisse des 4-Blattrührers oval, oval 45°, eckig und groß eckig werden in Kapitel 5.2.1 noch ausführlich dargestellt und diskutiert. Abb. 25 soll lediglich einen Überblick über die unterschiedliche Beanspruchung der Partikel durch die Verwendung verschiedener Rührer ermöglichen.

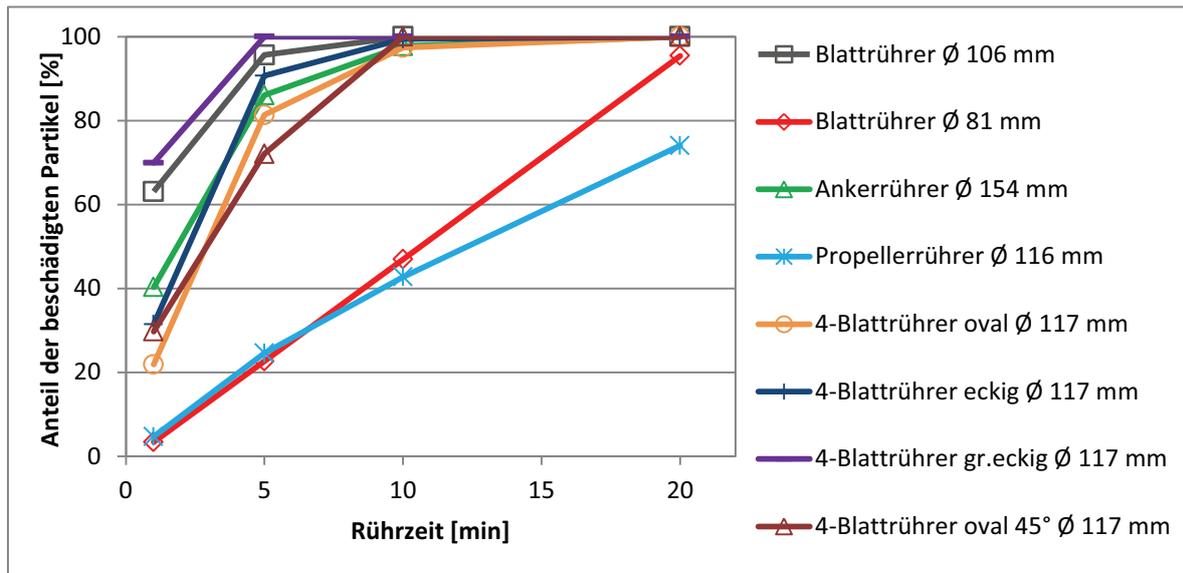


Abb. 25: Prozentualer Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (alle Rührer, 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kontinuierliche Phase: Wasser)

Aus Abb. 25 geht hervor, dass es sich bei dem 4-Blattrührer groß eckig offensichtlich um den scherintensivsten Rührer handelt. Bereits nach einer Minute Rührzeit weist dieser einen Anteil an beschädigten Partikeln von 69,91 % auf; dicht gefolgt vom Blattrührer ($\varnothing 106$ mm) mit einem Anteil von 63,07 %. Die geringste Beschädigung der Partikel nach einer Minute Rührzeit weisen der Blattrührer ($\varnothing 81$ mm) und der Propellerrührer mit jeweils ca. 4 % auf.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Beanspruchung der Partikel nicht nur aufgrund eines Faktors (Drehzahl/Umfangsgeschwindigkeit, Rührzeit, Blattgeometrie, Strömungsfeld) definiert werden kann. Offensichtlich spielt die Kombination der verschiedenen Faktoren eine große Rolle. Inwieweit jeder einzelne Faktor einen Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel hat, wird in den nachfolgenden Kapiteln untersucht.

Um den Einfluss der Drehzahl auf den Rührprozess zu verdeutlichen, werden verschiedene Drehzahlen für die Rührer gewählt. In Abb. 26 sind exemplarisch die prozentualen Anteile der einzelnen Kategorien für den großen Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm, in Abhängigkeit von der Drehzahl, dargestellt.

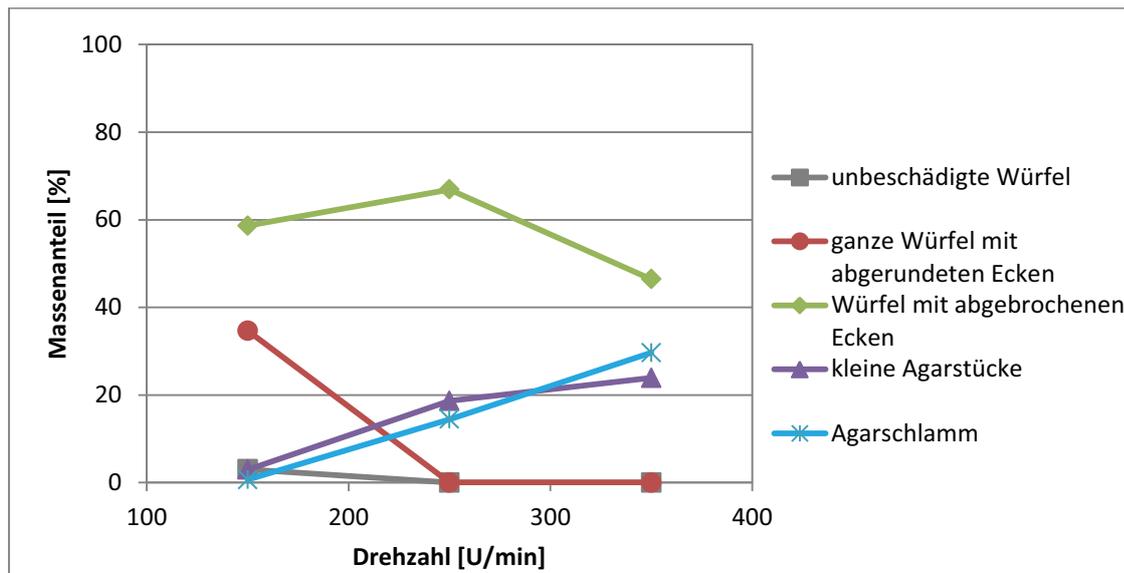


Abb. 26: Blattrührer \varnothing 106 mm - Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Drehzahl ($t=10$ min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Bei einer Drehzahl von 150 U/min beträgt der Anteil an unbeschädigten Würfeln 3,04 % und 34,68 % an ganzen Würfeln mit abgerundeten Ecken. Wird die Drehzahl auf 250 U/min erhöht, so sind keine Agarwürfel dieser beiden Kategorien mehr vorhanden. Den größten Anteil bei 150 U/min haben Würfel mit abgebrochenen Ecken (58,64 %). Dieser nimmt bei Erhöhung der Drehzahl auf 250 U/min, aufgrund der Zerstörung der unbeschädigten Partikel, auf 66,89 % zu. Bei einer Drehzahl von 150 U/min ist der Anteil der kleinen Agarstücke und des Agarschlammes gleich null. Mit Erhöhung der Drehzahl nimmt deren Anteil nahezu linear zu, bis er bei einer Drehzahl von 350 U/min 53,55 % beträgt. Je größer die Drehzahl, desto höher ist die Beschädigung der Agarwürfel. Die Drehzahl hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Beanspruchung der Agarwürfel. Allgemein wird erwartet, dass die Beanspruchung der Partikel mit der Rührerdrehzahl zunimmt (Reuß 1987). Die erzielten Ergebnisse haben diese Theorie entsprechend bestätigt.

In Abb. 27 sind die beschädigten Partikel (Kategorie C, D und E) der vier vorgestellten Rührer in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des Einflusses der Drehzahl auf die Beanspruchung der Partikel.

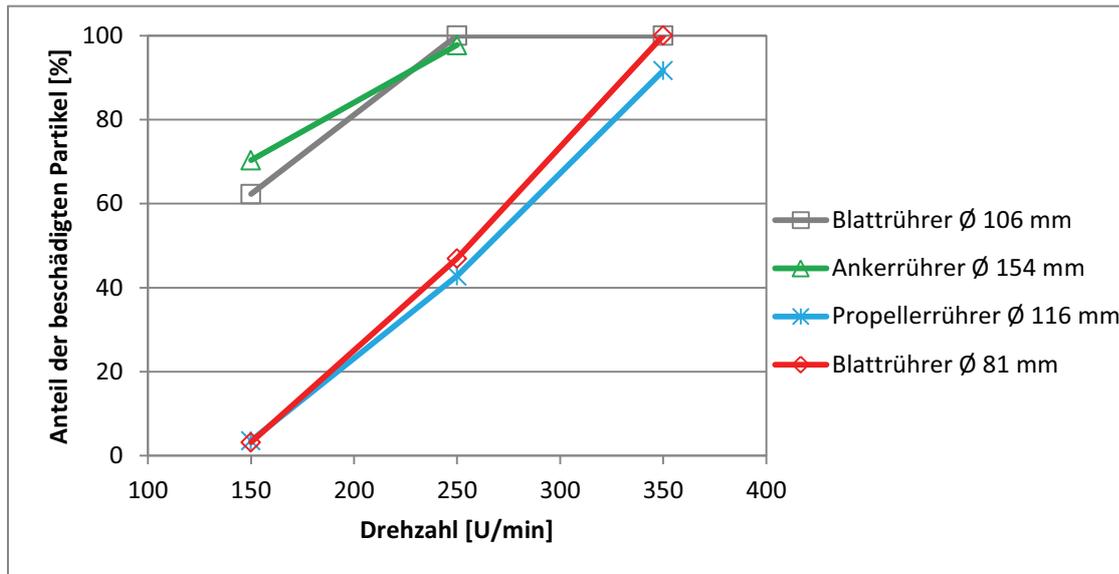


Abb. 27: Vergleich der Rührer - Prozentuale Anteile der beschädigten Würfel in Abhängigkeit von der Drehzahl (Agarwürfel ($c=1,0\%$), $t=10$ min, kontinuierliche Phase: Wasser)

Wie erwartet, ist die Beanspruchung der Partikel beim Propellerrührer bei allen drei Drehzahlen am geringsten. Des Weiteren weisen der Propeller- und der Blattrührer ($\varnothing 81$ mm) trotz unterschiedlichen Strömungsfeldes und unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit einen ähnlichen Verlauf der Kurve auf. Der Anstieg der Beschädigung der Partikel in Abhängigkeit zur Drehzahl ist bei diesen beiden Rührern nahezu linear. Bei 150 U/min haben beide Rührer nur ca. 3 % der Partikel beschädigt. Durch den größeren Durchmesser des Propellerrührers ist auch dessen Umfangsgeschwindigkeit größer als beim Blattrührer mit einem Durchmesser von 81 mm. Es hätte vermutet werden können, dass eine höhere Umfangsgeschwindigkeit auch zu einer stärkeren Beanspruchung der Partikel führt. Dies kann jedoch am Beispiel des Propeller- und des Blattrührers widerlegt werden. Der Blattrührer ($\varnothing 106$ mm) hingegen hat bei einer Drehzahl von 150 U/min bereits 62,28 % der Partikel zerstört. Auffällig ist, dass sich der Ankerrührer, trotz unterschiedlichen Strömungsfeldes und unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit, ähnlich dem Blattrührer ($\varnothing 106$ mm) verhält. Wie erwartet, hat der Ankerrührer bei 150 U/min bereits 70,34 % der Partikel zerstört. Allerdings weist der Ankerrührer auch die größte Umfangsgeschwindigkeit auf. Somit kann das Ergebnis von Reuß (1987) bestätigt werden, dass die Umfangsgeschwindigkeit nicht alleine für die mechanische Schädigung von Partikeln verantwortlich ist. Durch den Vergleich der Rührorgane wird festgestellt, dass z.B. die Theorie von Henzler & Biedermann (1996) und Hoffmann et al. (1992) nicht auf grobdisperse, scherempfindliche Stoffsysteme übertragen werden kann, da der axial fördernde Propellerrührer nicht, wie erwartet, zu der größten Beanspruchung der Partikel geführt hat.

5.2.1 Einfluss der Blattgeometrie

Um den Einfluss der Blattgeometrie auf die Beanspruchung der Partikel zu prüfen, wird eine Drehzahl von 250 U/min gewählt, da es bei dieser Drehzahl bereits in den Hauptversuchen zu einer deutlich nachweisbaren Beschädigung der Partikel kommt. Alle verwendeten Rührer haben mit 117 mm denselben Rührerdurchmesser, sodass alle Rührer mit 1,5 m/s dieselbe Umfangsgeschwindigkeit und eine Reynoldszahl von 33.927 haben. Die Form der Rührblätter ist somit der einzige Unterschied der Rührer, wodurch ein exakter Vergleich der Beanspruchung der Partikel durch unterschiedliche Geometrien (siehe Kapitel 4.2.5 und Abb. 15) möglich ist. Tab. 7 zeigt die verwendeten Rührorgane.

Tab. 7: Blattgeometrie verschiedener Rührer

Rührer	Rührerdurchmesser d [mm]	Blattlänge l_B [mm]	Blatthöhe h_B [mm]	Blattzahl	Anstellwinkel
4-Blatt eckig	117	38,5	22	4	/
4-Blatt gr.eckig	117	38,5	44	4	/
4-Blatt oval	117	38,5	22	4	/
4-Blatt oval	117	38,5	22	4	45°
Propeller	116	38,0	22	3	30°

Die kontinuierliche Phase besteht aus Wasser. Von diesem Versuch wird erwartet, dass deutliche Unterschiede im Beschädigungsgrad der Partikel festgestellt werden können. Der axialfördernde 4-Blattrührer, mit ovalen Rührblättern im 45° Winkel angestellt, sollte zu einer geringen Beschädigung der Partikel führen, als die radial fördernden 4-Blattrührer (Biedermann und Henzler 1996). Es wird weiterhin vermutet, dass die Kanten der eckigen Rührorgane die Partikel mehr beanspruchen werden, als die halbkreisförmig abgerundeten Rührblätter. Nach Biedermann (1994) verursachen Blattrührer mit relativ großer Blatthöhe beim Vergleich über die Leistung eine geringere Scherbeanspruchung, als Blattrührer mit kleiner Blatthöhe. Das würde bedeuten, dass beim Vergleich über die Drehzahl eine höhere Scherbeanspruchung für eine größere Blatthöhe erwartet wird, da der Leistungseintrag mit zunehmender Blatthöhe bei gleicher Drehzahl steigt.

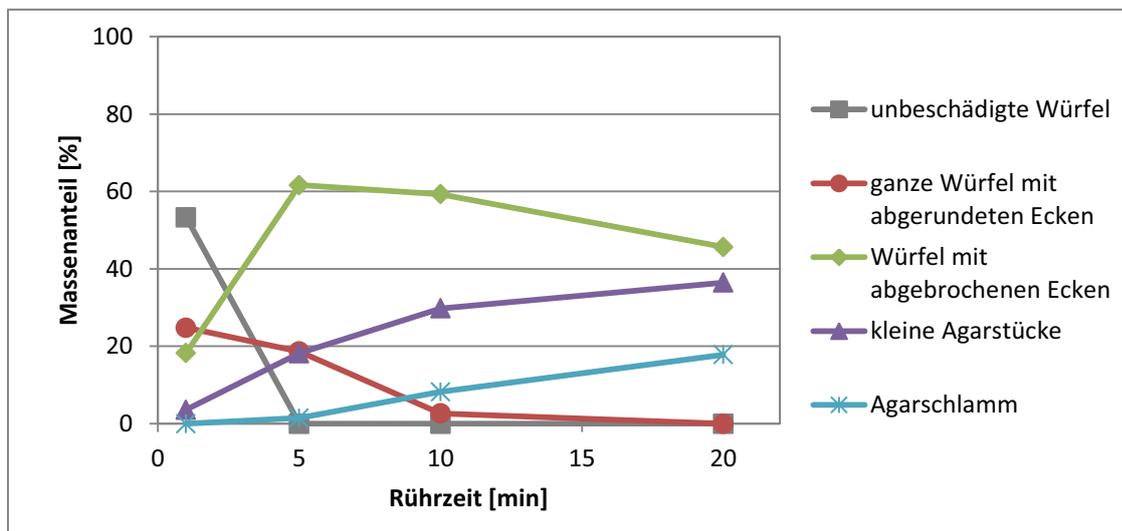


Abb. 28: 4-Blattrührer oval – Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kontinuierliche Phase: Wasser)

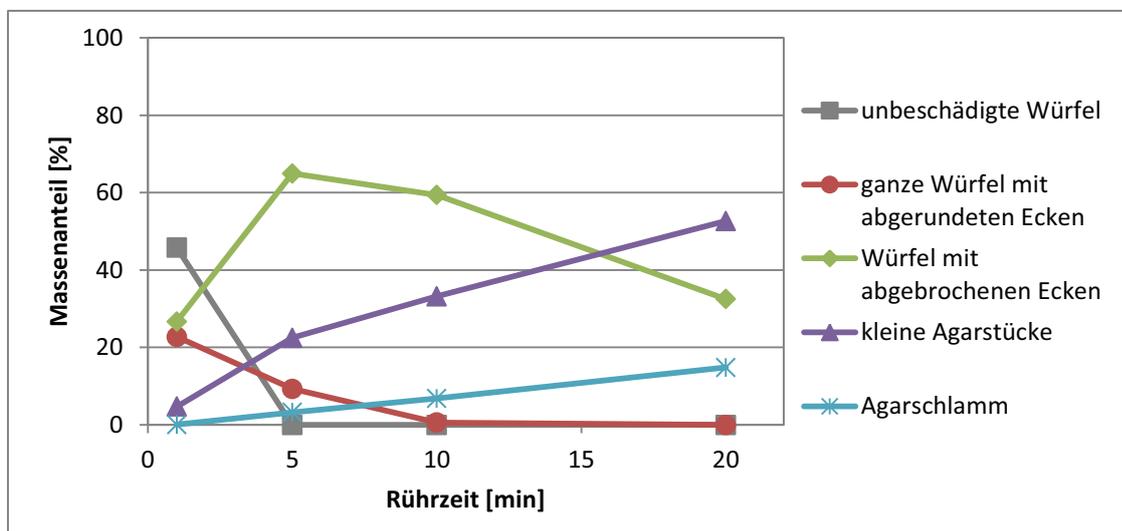


Abb. 29: 4-Blattrührer eckig – Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kontinuierliche Phase: Wasser)

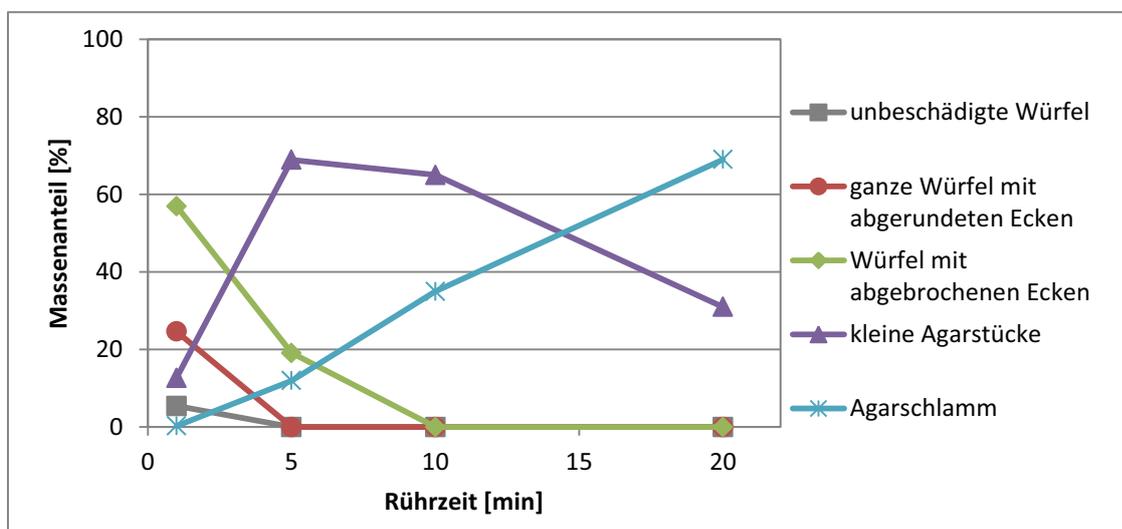


Abb. 30: 4-Blattrührer gr. eckig - Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kontinuierliche Phase: Wasser)

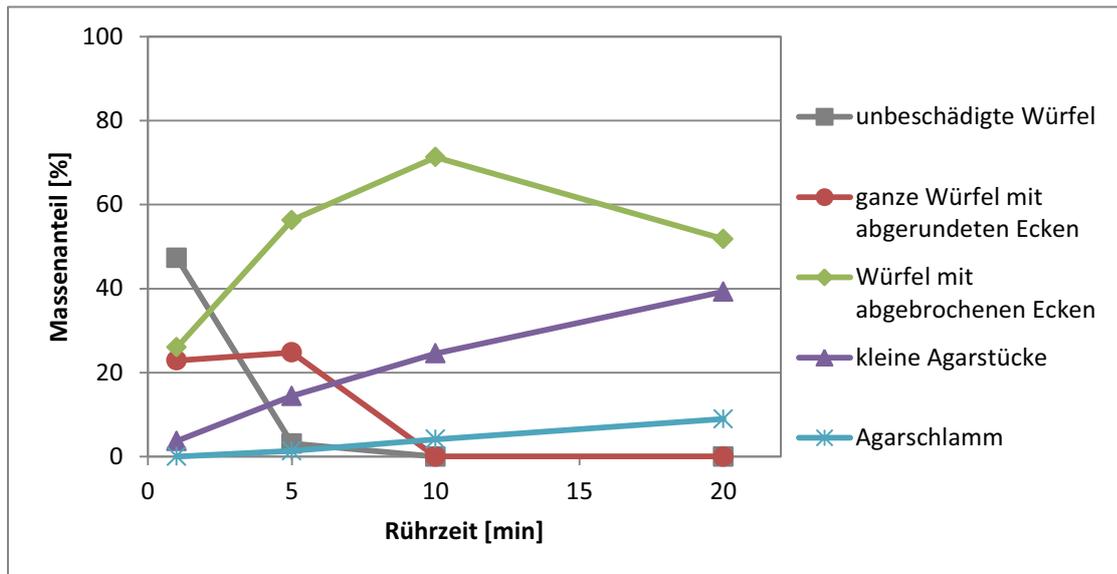


Abb. 31: 4-Blattrührer oval 45° - Prozentuale Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Als erstes werden die Ergebnisse der vier radial fördernden 4-Blattrührer (eckig, gr.eckig, oval und oval 45°) einzeln vorgestellt. In Abb. 28 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit für den 4-Blattrührer oval dargestellt. In Abb. 28 ist deutlich zu erkennen, dass nach einer Minute rühren nur noch 53,31 % der Agarwürfel vollkommen unbeschädigt sind. Nach fünf Minuten liegen bereits keine unbeschädigten Agarwürfel mehr vor, dafür steigt der Anteil an Würfeln mit abgebrochenen Ecken von 18,28 % auf 61,68 % an. Anschließend sinkt der Anteil an Agarwürfeln mit abgebrochenen Ecken auf 45,68 % nach einer Rührzeit von 20 Minuten. Der Anteil der Agarstücke und des Agarschlammes steigen langsam und nahezu linear an und haben nach 20 Minuten einen Anteil von 54,32 %.

Als nächstes werden die Ergebnisse der Beanspruchung der Agarwürfel durch den 4-Blattrührer eckig dargestellt. In Abb. 29 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Kategorien in Abhängigkeit von der Rührzeit abgebildet. Abb. 29 veranschaulicht die Ähnlichkeit der Blattgeometrie. Die Schaubilder für den 4-Blattrührer oval und den 4-Blattrührer eckig sind nahezu identisch. Ein deutlicher Unterschied ist erst nach einer Rührzeit von 20 Minuten festzustellen. Hier beträgt beim 4-Blattrührer eckig der Anteil an Würfeln mit abgebrochenen Ecken 32,51 % und der Anteil an Agarstücken 52,67 %. Im Gegensatz dazu beträgt beim 4-Blattrührer oval der Anteil an Würfeln mit abgebrochenen Ecken 45,68 % und der Anteil an Agarstücken 36,48 %. Da sonst alle Anteile bei jeder Rührzeit nahezu identisch sind, könnte dieser Unterschied nach einer Rührzeit von 20 Minuten ein Hinweis dafür sein, dass kleine Veränderungen der Rührergeometrie, in diesem Fall scharfe Kanten bzw. abgerundete Kanten, einen Einfluss auf die Beanspruchung der

Agarwürfel haben. Beim 4-Blattrührer eckig ist eine minimal größere Beanspruchung gegeben, aber der Unterschied ist sehr klein.

Als nächstes werden die Ergebnisse des radial fördernden 4-Blattrührers groß eckig vorgestellt. Seine Rührblätter haben die doppelte Höhe des 4-Blattrührers eckig. In Abb. 30 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Kategorien, in Abhängigkeit von der Rührzeit dargestellt. Aus Abb. 30 geht hervor, dass es eine Veränderung der Beanspruchung der Agarwürfel gibt, wenn die Blattgeometrie geändert wird. Im Vergleich zum 4-Blattrührer eckig ist die Blatthöhe h_B doppelt so groß. Die restliche Blattgeometrie ist identisch. Im Gegensatz zu den 4-Blattrührern oval und eckig, ist die Beanspruchung der Agarwürfel von Beginn an größer. Nach einer Rührzeit von einer Minute sind nur noch 5,45 % unbeschädigte Agarwürfel vorhanden. Der Anteil an ganzen Würfeln mit abgerundeten Ecken beträgt 24,64 %. Den größten Anteil mit 56,95 % haben die Würfel mit abgebrochenen Ecken. Nach einer Rührzeit von fünf Minuten sind keine unbeschädigten und keine Würfel mit abgerundeten Kanten mehr vorhanden und es kommt zu einer starken Abnahme der Würfel mit abgebrochenen Ecken auf 19,09 %. Dafür steigt der Anteil an kleinen Agarstücken auf 68,95 %. Bei einer Rührzeit von 20 Minuten sind nur noch kleine Agarstücke (30,98 %) und Agarschlamm (69,02 %) vorhanden. Die Zerstörung der Partikel ist beim 4-Blattrührer groß eckig insgesamt viel stärker, als bei den anderen 4-Blattrührern (eckig, oval, oval 45°). Die Blatthöhe h_B des 4-Blattrührers groß eckig ist doppelt so groß, wie bei den anderen verwendeten 4-Blattrührern.

Beim letzten Versuch wurden die ovalen Rührblätter verwendet. Allerdings wurden diese im 45° Winkel angestellt und somit eine Veränderung des Strömungsfeldes hervorgerufen. Bei diesem Rührer wird ein axiales Strömungsfeld erzeugt. Aus Abb. 31 geht hervor, dass sich der 4-Blattrührer oval, mit angestellten Rührblättern, genauso verhält, wie der 4-Blattrührer oval. Die Diagramme sind nahezu identisch, obwohl der 4-Blattrührer oval ein radiales und der 4-Blattrührer oval 45° ein axiales Strömungsfeld hat. Dadurch lässt sich vermuten, dass die Rührergeometrie einen wichtigen Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel hat.

Zusätzlich zu den vier 4-Blattrührern soll auch der Propellerrührer mit verglichen werden. Sein Rührerdurchmesser ist nur einen Millimeter kleiner als die der 4-Blattrührer und die Blatthöhe ist identisch. Der axial fördernde Propellerrührer sollte hierbei die kleinste Beanspruchung der Partikel verursachen, da bei diesem Versuch die Beanspruchung der Partikel über die Drehzahl verglichen wird (Biedermann & Henzler 1996; Hoffmann et al. 1992). Bei den folgenden Versuchen sind die verschiedenen Kategorien in die Fraktionen „unbeschädigte“ (Kategorie A und B) und „beschädigte“ (Kategorie C, D und E) Partikel zusammengefasst. Durch diese Vereinfachung lassen sich die Ergebnisse der Rührer mit abgewandelten Rührergeometrien besser vergleichen.

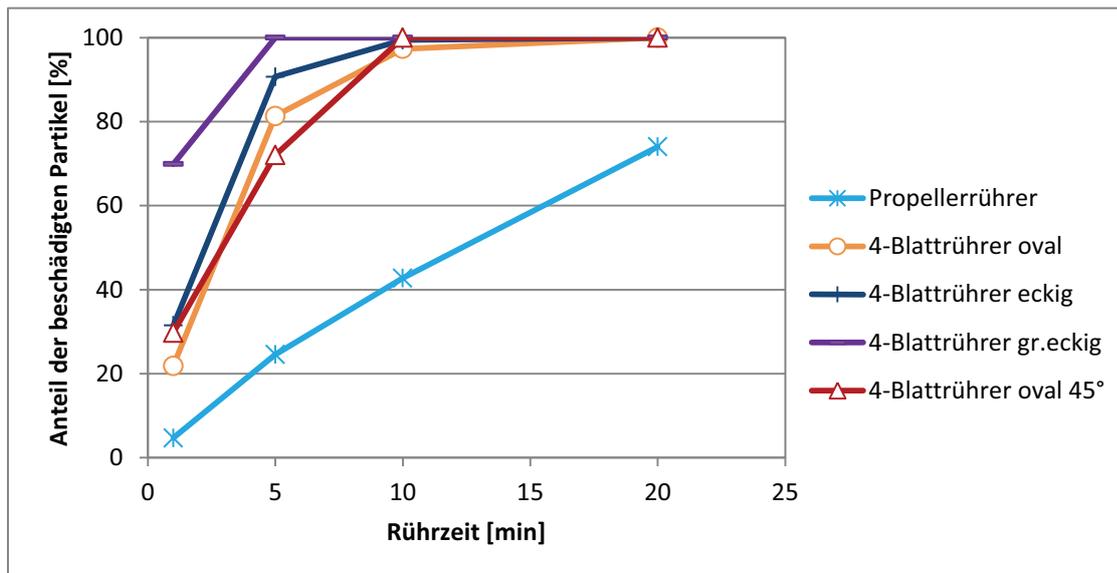


Abb. 32: Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kontinuierliche Phase: Wasser)

In Abb. 32 sind die Ergebnisse der Rührer mit verschiedenen Blattgeometrien dargestellt. Der Propellerrührer hat, wie erwartet, eine sehr geringe Beschädigung der Agarwürfel bewirkt. Selbst nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind noch 49,68 % der Partikel unbeschädigt. Der Anstieg der Beschädigung, bezogen auf die Zeit, ist beim Propellerrührer nahezu linear. Der 4-Blattrührer oval (45° Winkel) verursacht hingegen eine große Beanspruchung der Partikel. Bereits nach zehn Minuten sind alle Partikel ausnahmslos beschädigt. Für den Propeller- und den 4-Blattrührer oval (45° Winkel) sind ähnliche Ergebnisse erwartet worden, da sie beide ein axiales Strömungsfeld und eine ähnliche Rührergeometrie vorweisen. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Rührer könnte sein, dass der Propellerrührer nur drei Rührblätter hat, die im 30° Winkel angestellt sind. Insgesamt ist der Propellerrührer hydrodynamischer geformt und hat keine klaren Kanten und Linien wie der 4-Blattrührer oval mit angestellten Rührblättern (45° Winkel). Beim Vergleich des 4-Blattrührers oval mit dem 4-Blattrührer oval (45° Winkel), lässt sich bereits nach fünf Minuten Rührzeit ein Unterschied im Zerstörungsgrad feststellen. Während der 4-Blattrührer oval bereits 81,33 % der Partikel beschädigt hat, sind es beim 4-Blattrührer oval (45° Winkel) nur 72,05 %. Zwischen den radialförmigen 4-Blattrührern oval und eckig sind keine nennenswerten Unterschiede feststellbar. Lediglich nach fünf Minuten Rührzeit hat der 4-Blattrührer eckig 9,35 % mehr Partikel beschädigt. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass bei Zunahme der Blatthöhe auch der Beschädigungsgrad der Partikel deutlich steigt. Während die Beschädigung der Partikel bei den kleinblättrigen 4-Blattrührern nach einer Minute zwischen 21,89 % und 31,48 % liegt, sind bei dem großblättrigen 4-

Blattrührer bereits 69,91 % der Partikel beschädigt. Nach einer Rührzeit von fünf Minuten sind beim großblättrigen 4-Blattrührer alle Partikel zerstört.

Aus den Ergebnissen der Versuche zur unterschiedlichen Blattgeometrie lässt sich schließen, dass die Geometrie der Rührblätter einen großen Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel im Rührprozess hat. Selbst kleinste Abwandlungen führen durchaus zu einer veränderten Beanspruchung. Die Ergebnisse für die ovalen Rührblätter sind nahezu identisch, obwohl einer der beiden Versuche mit angestellten Rührblättern (45° Winkel) durchgeführt wurde und somit ein axiales und kein radiales Strömungsfeld verursacht. Selbst zwischen dem 4-Blattrührer oval und eckig konnte nach einer Rührzeit von 20 Minuten ein Unterschied in der Beanspruchung festgestellt werden. Der eckige 4-Blattrührer hat, vermutlich durch seine Kanten, eine etwas größere Beanspruchung bewirkt. Bei den kürzeren Rührzeiten konnte kein gravierender Unterschied festgestellt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Zunahme der Rührblatthöhe auch die Beanspruchung der Agarwürfel steigt. Hooker und Lee (1990) verglichen den Einfluss der Rührerblatthöhe und stellten einen Anstieg der Beschädigung von Zellen mit Vergrößerung der Blattfläche fest. Schon nach einer Minute Rührzeit wird die erhöhte Zerstörung der Partikel deutlich. Nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind 69,02 % Agarschlamm und 30,98 % kleine Agarstücke vorhanden.

5.2.2 Kritische Schubspannung

Die kritische Schubspannung wird durch die Ermittlung der Grenzdrehzahl näherungsweise festgelegt (siehe Kapitel 4.2.6). Das Ziel ist, für jede Festigkeit der Agarwürfel eine Grenzdrehzahl zu ermitteln, bei der die kritische Schubspannung erreicht ist, die zur Beanspruchung der Partikel führt. Durch die Ermittlung der kritischen Schubspannung verschiedener Partikel mit unterschiedlichen Festigkeiten (durch die Grenzdrehzahl) könnte in der Lebensmittelindustrie eine gezielte Auswahl von Rührern und Drehzahlen vorgenommen werden. Dies wäre die Grundlage für ein scherarmes Rühren von scherempfindlichen Stoffsystemen.

In Abb. 33 ist die Grenzdrehzahl in Abhängigkeit von der Festigkeit der Agarwürfel dargestellt. Bei einem Vergleich der Rührer über die Drehzahl wird erwartet, dass es beim axial fördernden Propellerrührer erst bei höheren Drehzahlen zu einer Beschädigung der Partikel kommt. Von dem radial fördernden 4-Blattrührer oval wird eine Beanspruchung der Partikel, bei niedrigen Drehzahlen, vermutet. Die radial fördernden Blattrührer (\varnothing 81 mm und \varnothing 106 mm) sollen aufgrund ihrer großen Blattfläche bei niedrigen Drehzahlen zu einer Zerstörung der Partikel führen. Allerdings sollte der große Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm zu einer stärkeren

Beschädigung führen als der kleine Blattrührer mit einem Durchmesser von 81 mm, da er bei gleicher Drehzahl eine höhere Umfangsgeschwindigkeit hat.

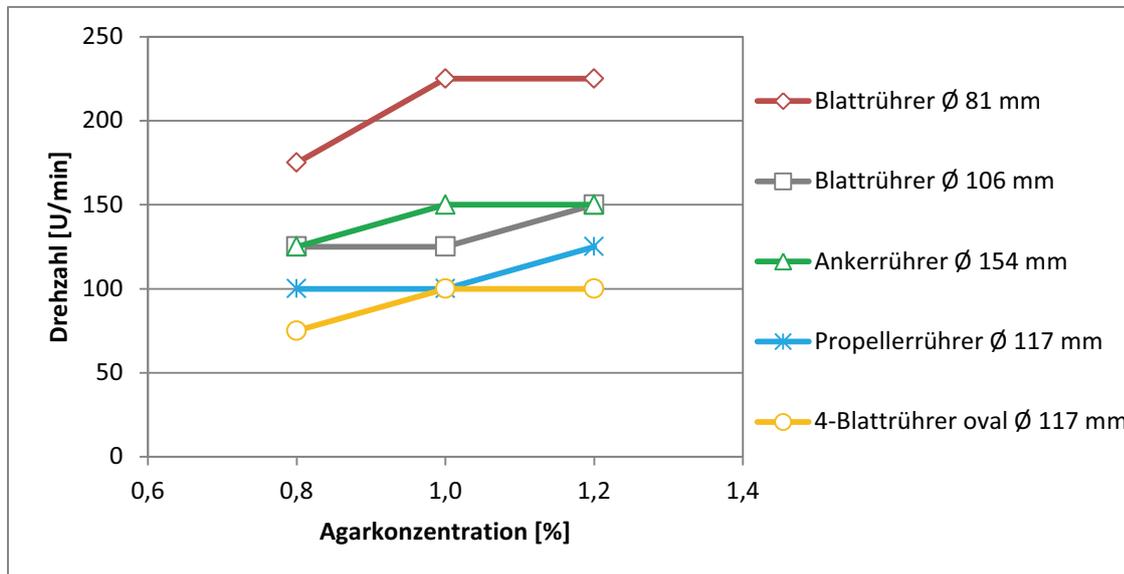


Abb. 33: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit von der Agarkonzentration (anhand der Drehzahl)

Abb. 33 lässt erkennen, dass der Propeller- und der 4-Blattrührer oval die niedrigste Grenzdrehzahlen haben. Das Ergebnis des Propellerrührers scheint zunächst den vorangegangenen Versuchsergebnissen zu widersprechen. Nach z.B. Knoch (2000) hat der Propellerrührer einen niedrigen Leistungseintrag. Dies und der kleine Anstellwinkel der Rührblätter von 30° führen zu einer geringen Umwälzung des Behälterinhaltes, sodass die Partikel der lokalen Beanspruchung in der Rührerzone weniger oft zugeführt werden. Die Partikel werden bereits bei einer Drehzahl von 100 U/min beschädigt, allerdings ist der prozentuale Anteil der beschädigten Partikel im Rührbehälter gering. Da in den vorangegangenen Versuchen ein Vergleich der Rührorgane über den Anteil der beschädigten Partikel, die nach derselben Rührzeit vorlagen, erfolgte, erwies sich der Propellerrührer entsprechend als scherarm. Dieser Hintergrund verdeutlicht, dass die Ergebnisse den vorangegangenen Versuchsergebnissen gerade nicht widersprechen. Der Blattrührer (\varnothing 81 mm) hat die größte Grenzdrehzahl und scheint somit am scherärmsten zu sein. Abb. 33 zeigt deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen der Grenzdrehzahl und der Festigkeit der Partikel besteht. Folglich besteht ebenfalls ein Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Festigkeit der Partikel, da durch Erhöhung der Drehzahl auch die Schubspannung steigt.

Damit auch der Durchmesser der Rührorgane beachtet wird, sollte die Umfangsgeschwindigkeit in Bezug auf die Festigkeit der Agarwürfel betrachtet werden. In Abb. 34 ist die kritische Umfangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Agarkonzentration dargestellt. Dies ermöglicht einen eindeutigen Vergleich der Grenzdrehzahl. Beim Vergleich anhand der Umfangsgeschwin-

digkeit wird erwartet, dass der Ankerrührer die Partikel nicht so stark beansprucht, wie beim Vergleich über die Drehzahl. Der große Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm sollte die Partikel aufgrund des höheren Energieeintrages mehr beanspruchen als der kleine Blattrührer mit einem Durchmesser von 81 mm.

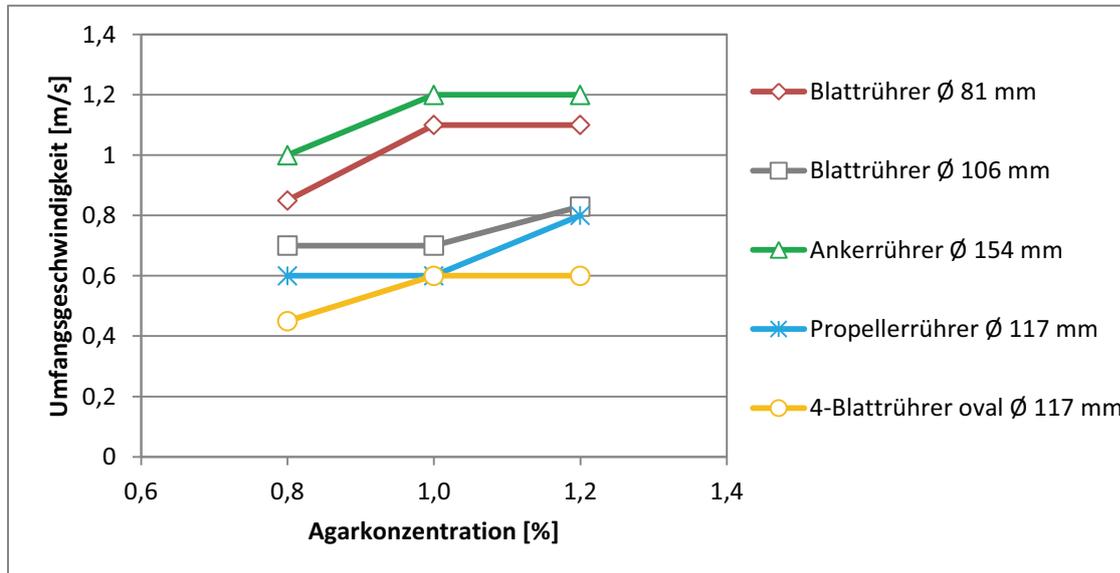


Abb. 34: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit von der Agarkonzentration (Vergleich anhand der Umfangsgeschwindigkeit)

In Abb. 34 ist deutlich zu erkennen, dass der Ankerrührer beim Vergleich über die Umfangsgeschwindigkeit, wie erwartet, der scherärmste Rührer ist. Beim Propeller- und beim 4-Blattrührer oval hat sich nichts geändert, d.h. sie sind weiterhin die scherintensivsten Rührer im Vergleich zu den anderen Rührern. Die Ergebnisse der beiden Blattrührer entsprechen ebenfalls den Erwartungen. Der große Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm ist scherintensiver als der kleine Blattrührer mit einem Durchmesser von 81 mm. Da bei diesem Versuch der Rührer nach einer Rührzeit von zwei Minuten gestoppt und nach einer optischen Kontrolle der Agarwürfel wieder neu angefahren wird, kann es eventuell durch das wiederholte Anfahren des Rührers zu einer erhöhten Beanspruchung der Partikel kommen. Je nach Rührertyp kann diese Beanspruchung bei einigen Rührern größer sein, als bei anderen. Die Ergebnisse eignen sich dazu, um die maximal zulässige Drehzahl/Umfangsgeschwindigkeit für Partikel mit unterschiedlicher Festigkeit zu ermitteln, sodass die Partikel nicht beschädigt werden.

5.3 Unterschiedliche Anteile an Agarwürfeln

In diesen Versuchsreihen geht es darum, den Einfluss des Partikelanteils im Rührbehälter auf die Beanspruchung der Partikel zu überprüfen. Hierfür werden die Anteile an Agarwürfeln in den verschiedenen Versuchen variiert. Die Drehzahl wird auf 150 U/min festgelegt, die kontinuierliche Phase besteht aus Wasser und die Rührzeit beträgt 20 min. Nach Stieß (2009) können bei einer Konzentration unter 0,5 Vol. % die Partikel-Partikel-Wechselwirkungen vernachlässigt werden. Ob diese Theorie auch für grobdisperse, scherempfindliche Partikel gilt, soll in den folgenden Versuchen überprüft werden. Die Hauptversuche werden alle mit 50 % Agarwürfeln und 50 % Wasser durchgeführt. Bei den nachfolgenden Versuchen wird der Anteil an Agarwürfeln zwischen 0,5 % und 66,67 % variiert. Zusätzlich stellt sich auch die Frage, welchen Einfluss die Form der Agarwürfel auf die Beanspruchung hat. Die Versuche mit dem variierenden Anteil an Agar werden deshalb auch für Agarkugeln durchgeführt. Es wird erwartet, dass die Beanspruchung der Partikel, mit Zunahme des Anteils an Agar, zunimmt. Der Grund für diese Erwartung ist, dass es mit Zunahme des Anteils an Agarwürfeln vermehrt zu Kollisionen zwischen Partikel und Rührer kommt (Liepe 1998). Zusätzlich haben die Partikel bei einer sehr hohen Partikeldichte keine Möglichkeit, der Stoßbeanspruchung des Rührers auszuweichen. Beim Vergleich zwischen Agarwürfeln und -kugeln, sollten die Agarkugeln aufgrund ihrer hydrodynamischen Form weniger beansprucht werden, als die Würfel. In Abb. 35 wird der Anteil der beschädigten Agarwürfel/-kugeln in Abhängigkeit von ihrem Anteil im Rührbehälter dargestellt.

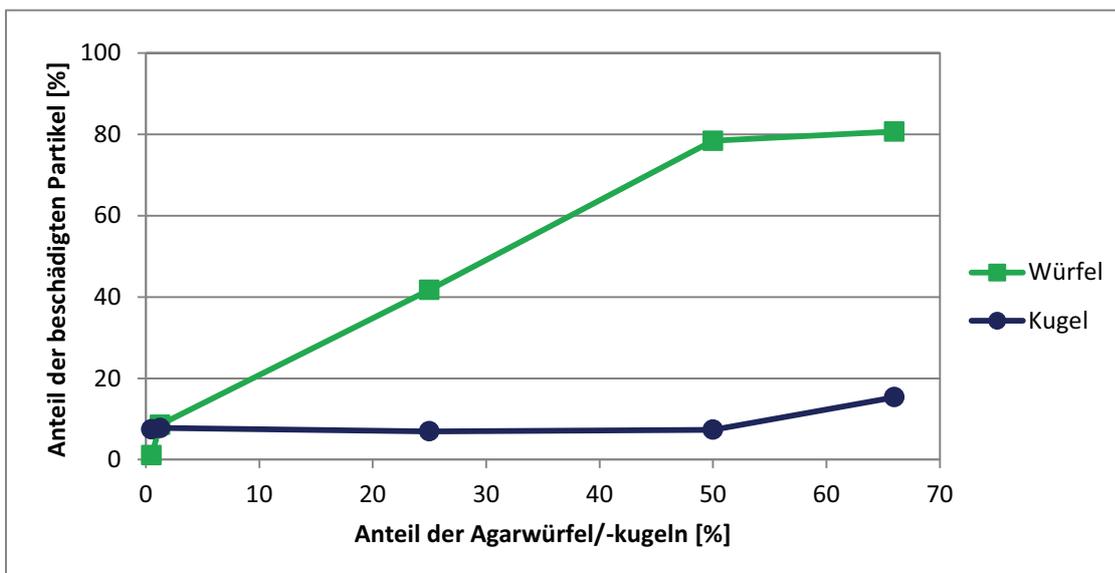


Abb. 35: Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit vom Anteil der Agarwürfel/-kugeln im Rührbehälter (Blattrührer 106 mm, 150 U/min, $t=20$ min, Agar ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Bei Betrachtung des Kurvenverlaufs der Agarwürfel lässt sich feststellen, dass die Beanspruchung der Agarwürfel, mit Erhöhung des Anteils an Agar im Rührbehälter, zunimmt. Die vorangestellten Erwartungen werden somit durch den Versuch bestätigt. Auffällig ist jedoch, dass es keinen beträchtlichen Unterschied zwischen einem Anteil an Agarwürfeln von 50 % und 66,67 % gibt. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Stoßbeanspruchung zunächst mit zunehmendem Anteil an Agarwürfeln steigt. Ab einem Anteil von 50 % Agarwürfeln kommt es zu einer Störung des Strömungsfeldes, sodass die Beanspruchung der Partikel nicht mehr zunimmt.

Der Verlauf der Kurve der Agarkugeln zeigt dagegen eine deutlich geringere Beanspruchung. Erst ab einem Anteil über 50 % Agarkugeln ist eine Zunahme der Beanspruchung festzustellen. Hier kann die Theorie, dass die Beschädigung der Agarkugeln mit Zunahme des Anteils steigt, nicht vollkommen bestätigt werden. Beim Vergleich zwischen Agarwürfeln und -kugeln stellt sich heraus, dass die Form der Partikel offensichtlich einen sehr großen Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel hat. Eine Kugel hat eine stabilere Form als ein Würfel. Die Ecken eines Würfels brechen viel schneller ab, als ein Stück aus einer Kugel heraus. Bei einem Anteil von 50 % beträgt der Anteil der beschädigten Würfel bereits 78,43 %. Der Anteil der beschädigten Kugeln hingegen liegt nur bei 7,35 %.

Rein optisch kann bei diesen Versuchen beobachtet werden, dass die Strömung während des Rührvorgangs, gerade mit einem hohen Anteil an Agarwürfeln, sehr viel inhomogener ist, als mit Agarkugeln. Wenn die Agarwürfel noch scharfkantig und unbeschädigt sind, so neigen sie dazu, sich hinter dem Stromstörer zu sammeln und mit der flachen Seite an der Behälterwand zu haften, während sie sich mit der Strömung bewegen. Dies ist bei niedrigen Drehzahlen, während des unversehrten Zustandes der Agarwürfel und ausschließlich ab einem Anteil an Agarwürfeln von 50 % zu beobachten. Die Agarkugeln hingegen haben durch ihre hydrodynamische Form nicht die Möglichkeit, an der Behälterwand zu haften oder sich hinter dem Stromstörer zu sammeln. Ihre Bewegung während des Rührprozesses wirkt dadurch sehr viel homogener.

Um den Einfluss der Strömungsform und des Rührers zu überprüfen, werden die Versuche mit einem geringen Anteil an Agarwürfeln/-kugeln, mit verschiedenen Rührorganen, durchgeführt. Hierfür werden der große, radial fördernde Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm, der axial fördernde Propellerrührer und der vorwiegend tangential fördernde Ankerrührer ausgewählt. Die Rührzeit beträgt 20 min bei einer Drehzahl von 150 U/min. Wichtig ist, dass in diesem und dem darauf folgenden Diagramm nicht der Anteil der beschädigten Partikel, sondern der Anteil an unbeschädigten Partikeln dargestellt wird. Die Abb. 36 zeigt den prozentualen An-

teil der unbeschädigten Agarwürfel in Abhängigkeit von dem Anteil an Agarwürfeln im Rührprozess.

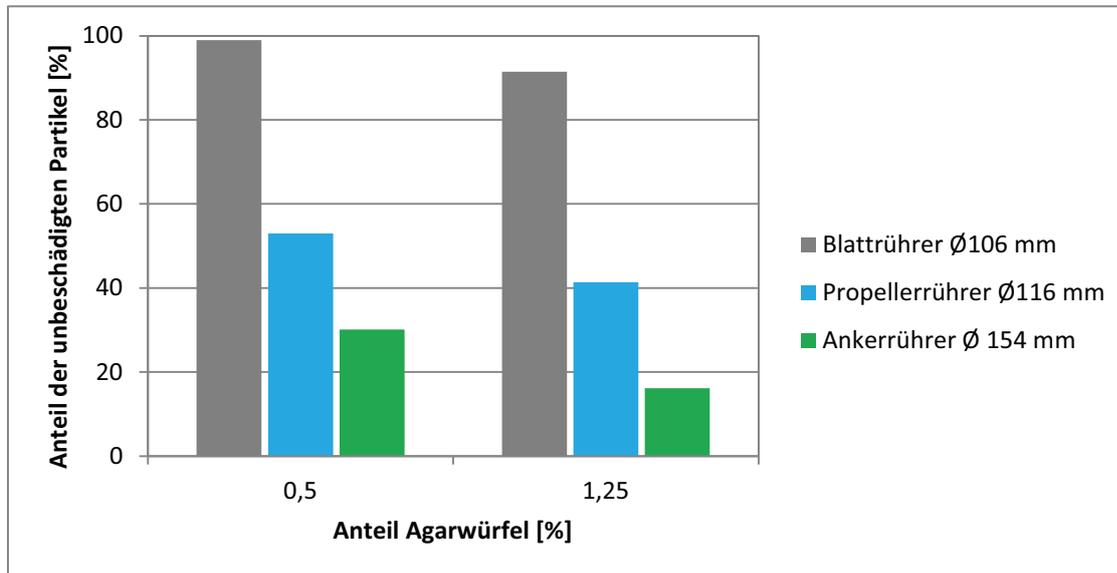


Abb. 36: Anteil der unbeschädigten Partikel in Abhängigkeit vom Anteil der Agarwürfel ($t=20$ min, 150 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

In Abb. 36 ist deutlich zu erkennen, dass der Blattrührer (\varnothing 106 mm) bei einem Anteil von 0,5 % und 1,25 % Agarwürfeln zu einer sehr geringen Beanspruchung der Agarwürfel führt. Bei einem Anteil von 0,5 % Agarwürfeln beträgt der Anteil an unbeschädigten Partikeln 98,94 %. Durch die Erhöhung des Anteils an Agarwürfeln auf 1,25 %, sinkt der Anteil an unbeschädigten Partikeln auf 92,23 %. Der Propellerrührer verursacht hingegen eine größere Beanspruchung der Partikel. Bei einem Anteil von 0,5 % Agarwürfel sind 52,99 % der Partikel unbeschädigt. Bei Erhöhung des Anteils an Agarwürfel auf 1,25 %, sinkt der Anteil an unbeschädigten Partikeln auf 41,37 %. Der vorwiegend tangential rührende Ankerrührer verursacht bei einem Vergleich über die Drehzahl die größte Beanspruchung der Agarwürfel. Bei einem Anteil von 0,5 % sind nur noch 30,14 % der Agarwürfel unbeschädigt. Durch die Erhöhung des Anteils an Agarwürfel auf 1,25 %, sinkt der Anteil an unbeschädigten Partikeln auf 16,14 %.

Insgesamt ist zu erkennen, dass bei allen drei Rührern mit Zunahme des Anteils an Agarwürfel auch die Beanspruchung der Partikel steigt. Durch die Zunahme des Anteils an Agarwürfel, kommt es vermehrt zu Kollisionen zwischen Partikel und Rührer (Liepe 1998). Die Partikel-Partikel-Wechselwirkung kann bei diesen niedrigen Anteilen an Agarwürfeln vernachlässigt werden, d.h. dass die Beanspruchung der Partikel entweder auf die Rührergeometrie oder die Strömungsform der Rührer zurückzuführen ist. Bei den Agarkugeln ist ein anderes Verhalten ersichtlich.

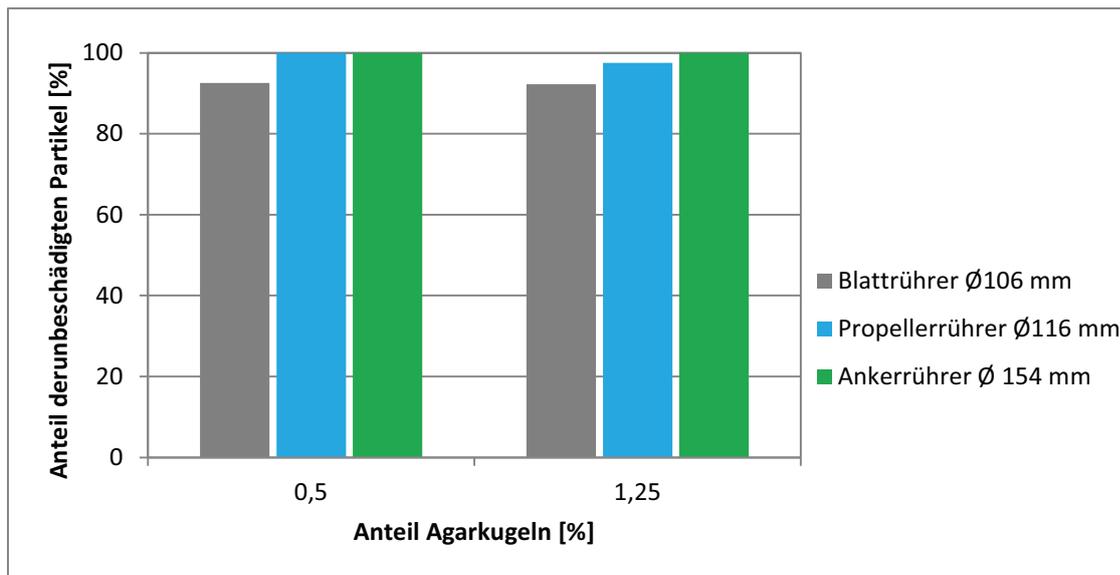


Abb. 37: Prozentualer Anteil der unbeschädigten Partikel in Abhängigkeit vom Anteil der Agarkugeln ($t=20$ min, 150 U/min, Agarkugeln ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser)

Abb. 37 zeigt den prozentualen Anteil der unbeschädigten Agarwürfel in Abhängigkeit von dem Anteil an Agarkugeln im Rührprozess. Im Gegensatz zu den Agarwürfeln, ist bei den Agarkugeln kein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Rührern feststellbar. Auch bei Erhöhung des Anteils an Agarkugeln, ist keine größere Beanspruchung zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Agarkugeln durch ihre hydrodynamische Form dem Rührer besser „ausweichen“ können und somit die Stoßbeanspruchung kleiner ist, als bei Agarwürfeln.

Insgesamt wird festgestellt, dass der Anteil der Agarwürfel einen starken Einfluss auf deren Beanspruchung hat. Je größer der Anteil an Agarwürfeln, desto größer ist auch deren Beanspruchung. Bei den Agarkugeln wird dies nur begrenzt festgestellt, da die Agarkugeln durch ihre hydrodynamische Form offensichtlich eine geringere Stoßbeanspruchung durch den Rührer erfahren.

5.4 Unterschiedliche Festigkeit der Agarwürfel

Um den Einfluss der Konzentration bzw. der Festigkeit der Agarwürfel auf die Beanspruchung dieser zu untersuchen, wird die Konzentration der Agarwürfel verändert. Für die Versuche werden jeweils Agarwürfel mit Konzentrationen von $c=0,8$ %, $c=1,0$ % und $c=1,2$ % hergestellt. Durch diesen Versuch soll der Einfluss der Festigkeit der Agarwürfel auf deren Beanspruchung bestimmt werden. Es ist zu erwarten, dass die Beanspruchung der Agarwürfel mit Abnahme der

Festigkeit deutlich ansteigt. Durch die Abnahme der Festigkeit werden die Agarwürfel scherempfindlicher und somit nimmt die Beschädigung zu. In Abb. 38 ist der prozentuale Anteil der beschädigten Partikel, in Abhängigkeit von der Rührzeit, dargestellt. Hierfür wird eine Drehzahl von 250 U/min, Wasser als kontinuierliche Phase und der große, radial fördernde Blattrührer, mit einem Durchmesser von 106 mm, als Rührer gewählt.

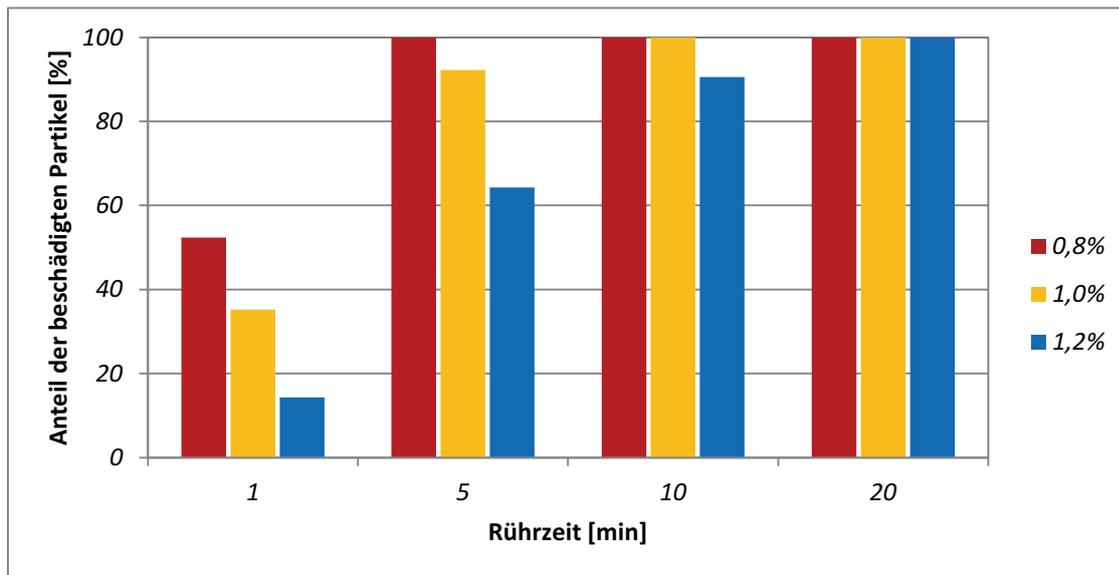


Abb. 38: Blattrührer \varnothing 106 mm - Prozentualer Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel, kontinuierliche Phase: Wasser)

Es ist unverkennbar, dass die Festigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Beanspruchung der Agarwürfel hat. Nach einer Minute Rührzeit liegt der Anteil der beschädigten Partikel mit einer Konzentration von $c=0,8\%$ bei 52,35 %, mit $c=1,0\%$ bei 35,16 % und mit $c=1,2\%$ bei 14,34 %. Die Anteile der beschädigten Partikel steigen proportional zur Rührzeit und zur Festigkeit der Agarwürfel. Die unterschiedlichen Festigkeiten der Agarwürfel spiegeln sich im Anteil der beschädigten Partikel wider. Die vorangestellten Erwartungen zum Einfluss der Festigkeit der Agarwürfel können somit für den Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm bestätigt werden. Je geringer die Festigkeit der Agarwürfel, desto größer ist die Scherempfindlichkeit der Agarwürfel.

Um den Einfluss der Festigkeit bei verschiedenen Rührorganen mit unterschiedlichen Strömungsformen zu überprüfen, wird dieser Versuch anschließend mit dem axial fördernden Propellerrührer durchgeführt. Auch hier wird erwartet, dass die Beanspruchung der Agarwürfel im direkten Bezug zur Festigkeit der Agarwürfel steht. Abb. 39 zeigt die Ergebnisse für den Propellerrührer.

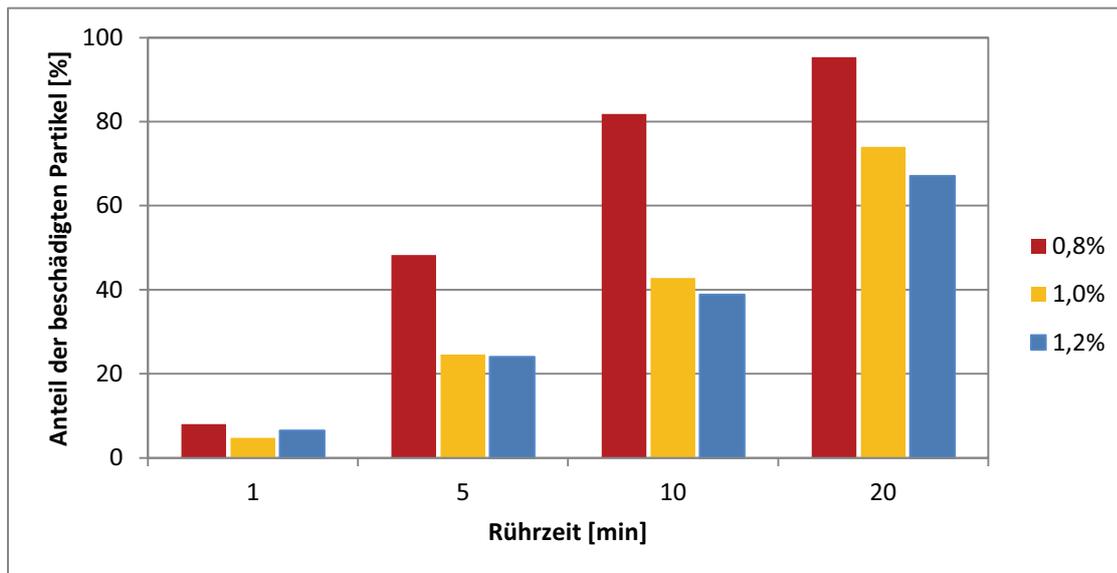


Abb. 39: Propellerrührer - Prozentuale Anteile der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel, kontinuierliche Phase: Wasser)

Auch beim Propellerrührer ist zu erkennen, dass die Festigkeit der Agarwürfel einen Einfluss auf die Beanspruchung der Agarwürfel hat. Nach zehn Minuten Rührzeit liegt der Anteil der beschädigten Partikel mit einer Konzentration von $c=0,8\%$ bei 81,78 %, mit $c=1,0\%$ bei 42,77 % und mit $c=1,2\%$ bei 38,80 %. Der Unterschied in der Beanspruchung der Partikel zwischen dem Agar mit einer Konzentration von $c=1,0\%$ und $c=1,2\%$ ist nicht so ausgeprägt, wie beim Blatt-rührer ($\varnothing 106\text{ mm}$). Bei allen Rührzeiten sind es lediglich bis zu 7 % mehr beschädigte Partikel bei $c=1,0\%$. Dennoch ist bei allen drei Konzentrationen eine Zunahme der Beanspruchung der Partikel mit Verlängerung der Rührzeit zu beobachten.

Eine mögliche Erklärung für die ähnlichen Ergebnisse der Konzentration $c=1,0\%$ und $c=1,2\%$ wäre, dass die Festigkeit des Agars ab einer gewissen Agarkonzentration keinen entscheidenden Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel hat. Oder das zum Beispiel das axiale Strömungsfeld des Propellerrührers nur bis zu einer gewissen Festigkeit des Agars einen Einfluss auf die Beschädigung der Agarwürfel hat.

Als letztes wird der Versuch mit dem vorwiegend tangential fördernden Ankerrührer durchgeführt. Auch hier wird wieder erwartet, dass die Beanspruchung der Agarwürfel nahezu proportional mit der Festigkeit des Agars steigt.

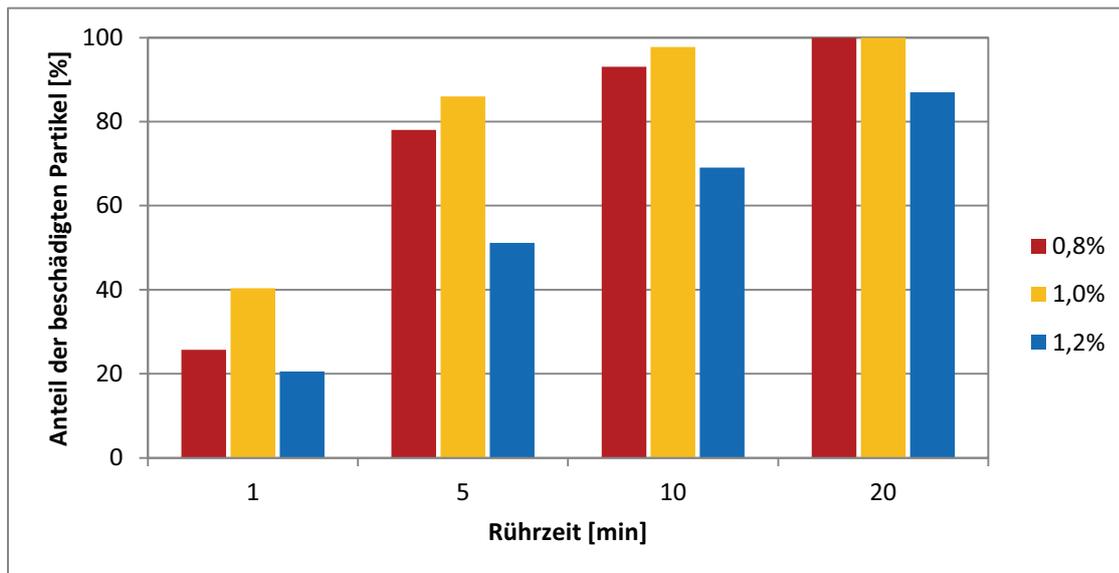


Abb. 40: Ankerrührer - Prozentuale Anteile der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel, kontinuierliche Phase: Wasser)

Abb. 40 stellt die Anteile der beschädigten Partikel des Ankerrührers in Abhängigkeit von der Rührzeit dar. Die Ergebnisse des Ankerrührers unterscheiden sich hierbei stark von den Ergebnissen des Propeller- und Blattrührers (\varnothing 106 mm). Nach zehn Minuten Rührzeit liegt der Anteil der beschädigten Partikel mit einer Konzentration von $c=0,8$ % bei 93,05 %, mit $c=1,0$ % bei 97,74 % und mit $c=1,2$ % bei 69,07 %. Die Beanspruchung der Partikel mit einer Konzentration von $c=0,8$ % und $c=1,0$ % ist für $t \geq 5$ min nahezu gleich. Bei $t = 1$ ist die Schädigung der Partikel mit $c=0,8$ % deutlich kleiner als bei Partikel mit $c=1,0$ %. Das Ergebnis entspricht zunächst nicht der vorangestellten Erwartung, dass mit Erhöhung der Festigkeit die Schädigung der Partikel vermindert wird. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der wandgängige Ankerrührer die Partikel nicht nur durch eine Stoßbeanspruchung sondern auch durch Zerdrücken an der Wand beschädigt. Je weicher die Partikel sind, desto elastischer sind sie auch. Die Partikel mit einer Konzentration von $c=0,8$ % sind somit elastischer als die Partikel mit $c=1,0$ %. Die Elastizität ist der Grund dafür, dass die Partikel weniger an der Wand zerdrückt werden, d.h. der Anteil der beschädigten Partikel ist bei $c=0,8$ % geringer. Bei einer Konzentration von $c=1,0$ % scheinen die Partikel gleichermaßen durch Zerdrücken an der Wand und durch Stoßbeanspruchung beschädigt zu werden. Bei Partikeln mit einer Konzentration von $c=1,2$ % ist die Elastizität nicht mehr gegeben, die erhöhte Festigkeit führt aber zu einer erhöhten Stabilität und somit zu einer geringeren Beschädigung der Partikel.

In Abb. 41 ist eine Übersicht der drei verschiedenen Rührer dargestellt.

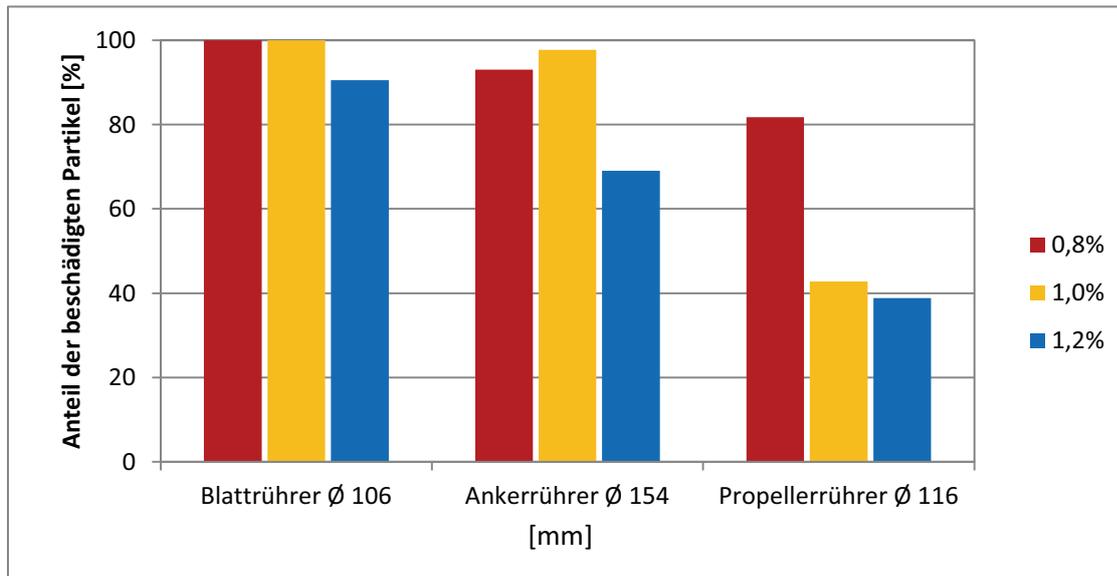


Abb. 41: Prozentuale Anteile der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Konzentration der Agarwürfel (250 U/min, t=10 min, Agarwürfel, kontinuierliche Phase: Wasser)

Abb. 41 stellt die Ergebnisse der verschiedenen Rührer dar. Bei allen drei Rührern ist deutlich zu erkennen, dass die Festigkeit der Agarwürfel einen sehr großen Einfluss auf deren Scherempfindlichkeit hat. Je höher die Festigkeit der Agarwürfel, desto kleiner ist der Anteil der beschädigten Partikel. Die vorangestellte Erwartung wird somit zumindest vom Propeller- und vom Blattrührer (Ø 106 mm) bestätigt. Der Ankerrührer erfüllt die Erwartung nur für Agar mit einer Konzentration von $c=1,0\%$ und $c=1,2\%$. Die Ergebnisse für den Agar mit einer Konzentration von $c=0,8\%$ scheinen hierbei den ursprünglichen Erwartungen zu widersprechen. Die Wandgängigkeit des Ankerrührers führt nicht nur zu einer Stoßbeanspruchung, sondern auch zu einem Zerdrücken an der Wand. Je elastischer die Partikel, desto weniger werden sie durch Zerdrücken beansprucht. Die Partikel $c=0,8\%$ sind elastischer als Partikel mit einer Konzentration von $c=1,0\%$ und werden somit weniger durch Zerdrücken an der Wand beschädigt, sodass der Anteil der beschädigten Partikel geringer ist.

Des Weiteren spiegelt Abb. 41 die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 5.2 wieder. Auch bei den Versuchen zur unterschiedlichen Festigkeit der Agarwürfel, stellt sich der Blattrührer (Ø 106 mm) als der scherintensivste Rührer heraus, dicht gefolgt vom Ankerrührer – beim Vergleich über die Drehzahl. Der Propellerrührer hingegen ist der scherärmste der drei vorgestellten Rührer.

5.5 Erhöhte Viskosität der kontinuierlichen Phase

Um den Einfluss der kontinuierlichen Phase auf die Beanspruchung der Agarwürfel zu untersuchen, wird die kontinuierliche Phase mit Glucosesirup angedickt. Da es sich bei Glucosesirup um ein newtonsches Fluid handelt, ist die Viskosität im Rührbehälter von der Schergeschwindigkeit unabhängig. Für die folgenden Versuche wird eine Viskosität der kontinuierlichen Phase von ca. 2,5 Pas (siehe Kapitel 4.2.7) eingestellt. Die Konzentration der Agarwürfel ist $c=1,0\%$ und die Drehzahl beträgt 250 U/min. Für das Ergebnis können unterschiedliche Erwartungen angestellt werden. Zum einen kann die Beanspruchung der Partikel mit Erhöhung der Viskosität steigen. Da die Strömung mit Erhöhung der Viskosität laminarer wird, verringert sich auch die Geschwindigkeit der einzelnen Partikel und somit ist die Stoßbeanspruchung durch den Aufprall des Rührorgans auf die Partikel größer. Zum anderen kann die Beanspruchung der Partikel mit Erhöhung der Viskosität sinken. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die Strömung laminarer wird und die Partikel dadurch nicht so stark von der Strömung beansprucht werden können. Nach Midler und Finn (1966) und Märkl et al. (1987) müsste eine steigende Viskosität bei konstanter Rührerdrehzahl zu einer Zunahme der Schädigung von kleinen Partikel führen. Allerdings wird diese Theorie von Tanaka (1975) widerlegt, da er eine Abnahme der Schädigung bei steigender Viskosität bei konstanter Rührerdrehzahl beobachtete. In Abb. 42 ist der Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit am Beispiel des Blattrührers ($\varnothing 106\text{ mm}$) dargestellt.

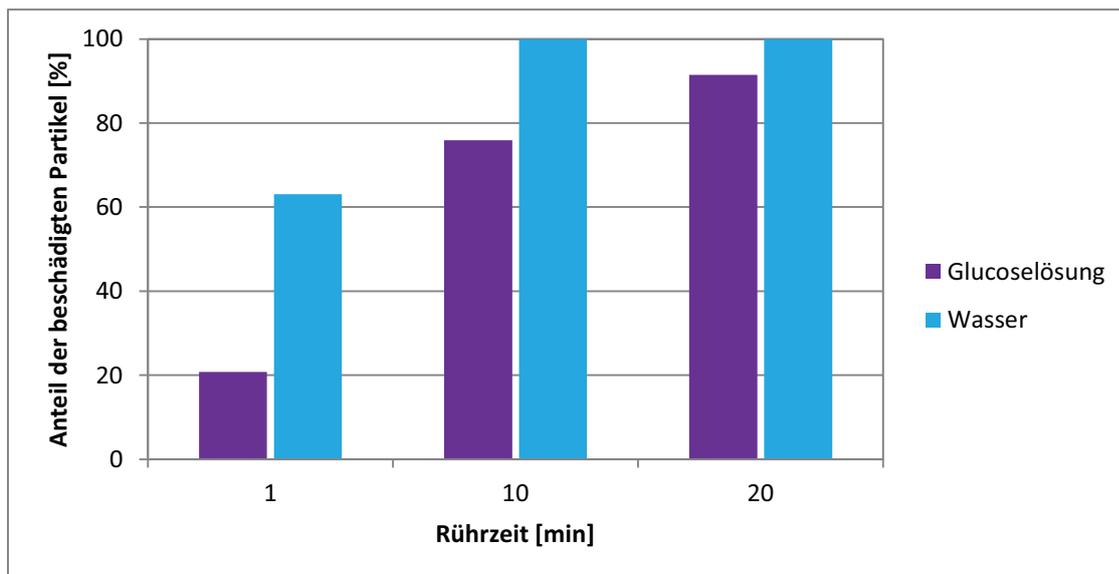


Abb. 42: Blattrührer $\varnothing 106\text{ mm}$ – Prozentualer Anteil der beschädigten Agarwürfel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kontinuierliche Phase: Wasser und Glucoselösung)

Nach einer Rührzeit von einer Minute ist ein deutlicher Unterschied zwischen den zwei verschiedenen kontinuierlichen Phasen erkennbar. Während der Anteil der beschädigten Partikel bei Wasser 63,07 % beträgt, ist dieser Anteil bei der Glucoselösung bei 20,74 %. Bei Wasser als kontinuierlicher Phase sind bereits nach zehn Minuten 100 % der Partikel beschädigt. Der Anteil der beschädigten Partikel in der Glucoselösung beträgt nach einer Rührzeit von zehn Minuten 75,90 %. Selbst nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind nur 91,48 % der Partikel in der Glucoselösung beschädigt. Es ist somit deutlich zu erkennen, dass die Beanspruchung der Agarwürfel mit Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase sinkt. Um den Einfluss des Rührers auf die Beschädigung der Partikel bei veränderter, kontinuierlicher Phase zu überprüfen, wird der Versuch zusätzlich mit einem Anker- und Propellerrührer durchgeführt. In Abb. 43 sind die Ergebnisse für den Propellerrührer dargestellt.

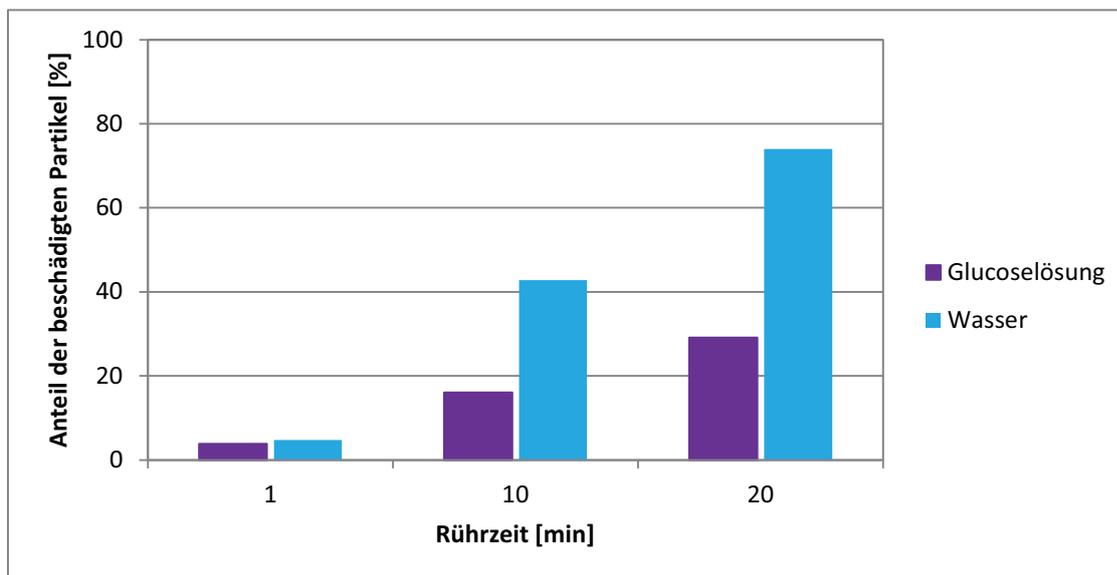


Abb. 43: Propellerrührer - Prozentualer Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser und Glucoselösung)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Beanspruchung der Partikel mit abnehmender Viskosität größer wird. Nach einer Rührzeit von, zum Beispiel 10 Minuten, beträgt der Anteil der beschädigten Partikel, mit Wasser als kontinuierliche Phase, bereits 42,77 %. Wird als kontinuierliche Phase die Glucoselösung gewählt, so liegen nur 16,07 % beschädigte Partikel im Rührbehälter vor. Auch beim Propellerrührer kann somit eindeutig festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase zu einer Verringerung der Beschädigung der Partikel führt. Als letztes wird dieser Versuch nun mit dem Ankerrührer durchgeführt. Nach dem Ergebnis der vorangehenden Versuche, wird nun auch hier erwartet, dass sich der Anteil der beschädigten

Partikel mit Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase verringert. Abb. 44 stellt die Ergebnisse für den Ankerrührer dar.

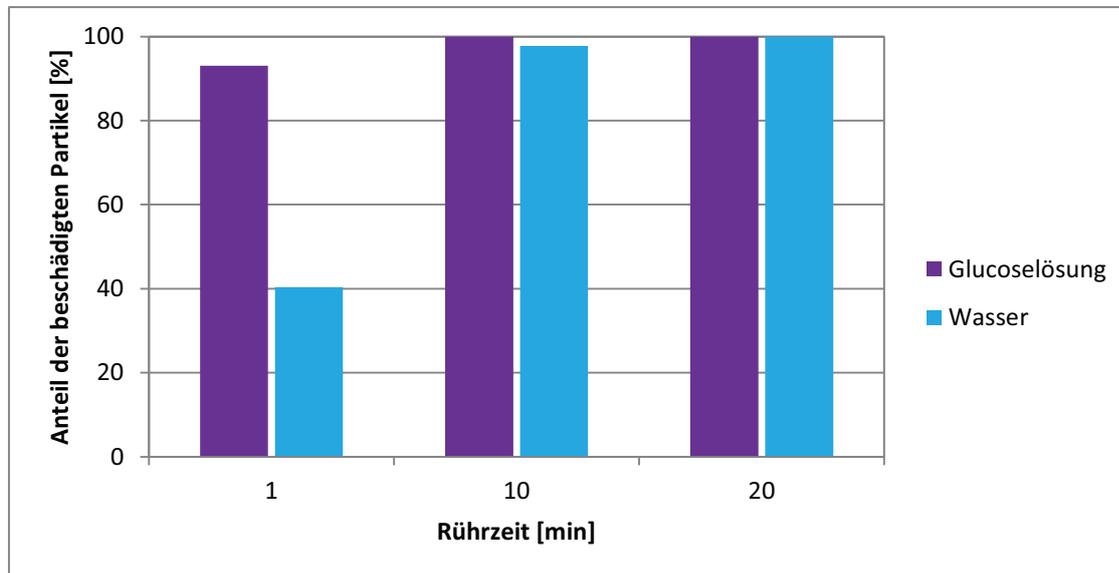


Abb. 44: Ankerrührer - Prozentualer Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit (250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser oder Glucoselösung)

Auffällig ist, dass die Beanspruchung der Partikel beim Ankerrührer sehr viel höher ist, als bei den beiden anderen Rührern (Propeller- und Blattrührer (\varnothing 106 mm)). Nach einer Rührzeit von einer Minute sind bei Wasser als kontinuierlicher Phase 40,33 % der Partikel beschädigt. Wird als kontinuierliche Phase Glucoselösung gewählt, dann sind bereits 93,06 % der Partikel beschädigt. Auch bei einer Rührzeit von zehn Minuten ist dies festzustellen. Nach einer Rührzeit von 20 Minuten sind bei beiden kontinuierlichen Phasen 100 % der Partikel beschädigt. Die Beanspruchung der Partikel durch den Ankerrührer, innerhalb der verschiedenen kontinuierlichen Phasen, ist bei einer Minute Rührzeit genau umgedreht, als bei den anderen beiden Rührern.

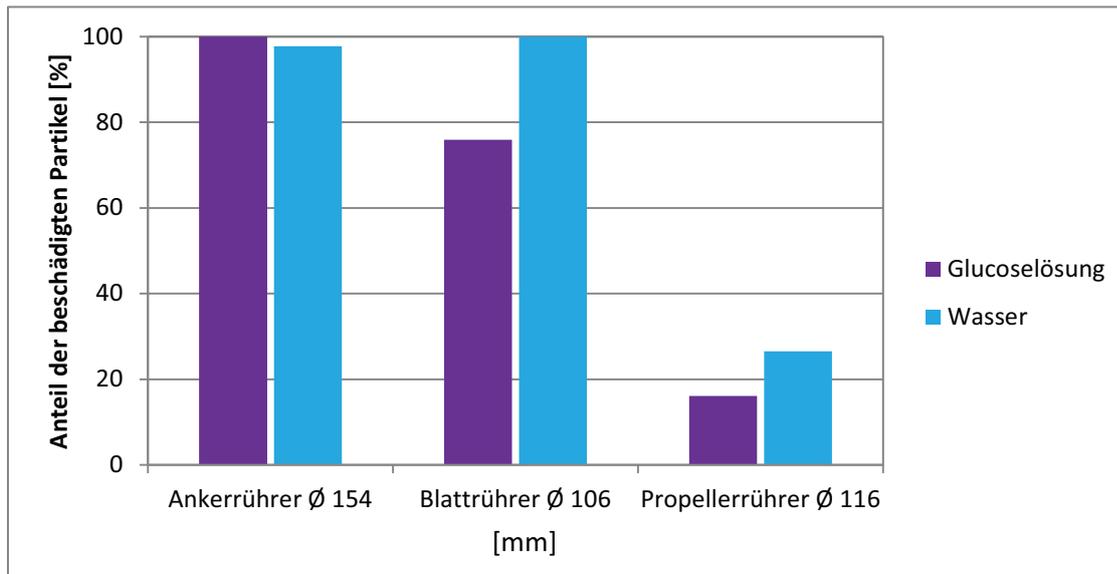


Abb. 45: Prozentuale Anteile der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der kontinuierlichen Phase (250 U/min, t=10 min, Agarwürfel (c=1,0 %))

Abb. 45 zeigt den Anteil der beschädigten Partikel, in Abhängigkeit von der kontinuierlichen Phase, nach einer Rührzeit von zehn Minuten bei 250 U/min. Beim Blatt- und Propellerrührer ist deutlich zu erkennen, dass eine Erhöhung der Viskosität zu einer geringeren Beschädigung der Partikel führt. Der Anteil der beschädigten Partikel beim Propellerrührer liegt bei Verwendung der Glucoselösung ca. 10 % niedriger, als bei Wasser. Im Gegensatz dazu ist beim Ankerrührer kein deutlicher Unterschied zwischen den beiden kontinuierlichen Phasen feststellbar. Der Anteil der beschädigten Partikel liegt zwischen 97,74 % und 100 %.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Beanspruchung der Agarwürfel mit Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase sinkt. Für den Ankerrührer kann diese Aussage nicht bestätigt, aber auch nicht widerlegt werden, da die Ergebnisse der verschiedenen kontinuierlichen Phasen nahezu identisch sind – ausgenommen bei einer Rührzeit von einer Minute.

Um den Einfluss der Reynoldszahl auf die Beschädigung der Partikel zu überprüfen, wird die Reynoldszahl für Wasser und Glucoselösung berechnet. Dies ermöglicht einen Vergleich des Einflusses der Drehzahlen und der Viskosität der Lösung auf die Beanspruchung der Agarwürfel.

Abb. 46 stellt die Ergebnisse exemplarisch für den großen Blattrührer mit einem Durchmesser von 106 mm dar.

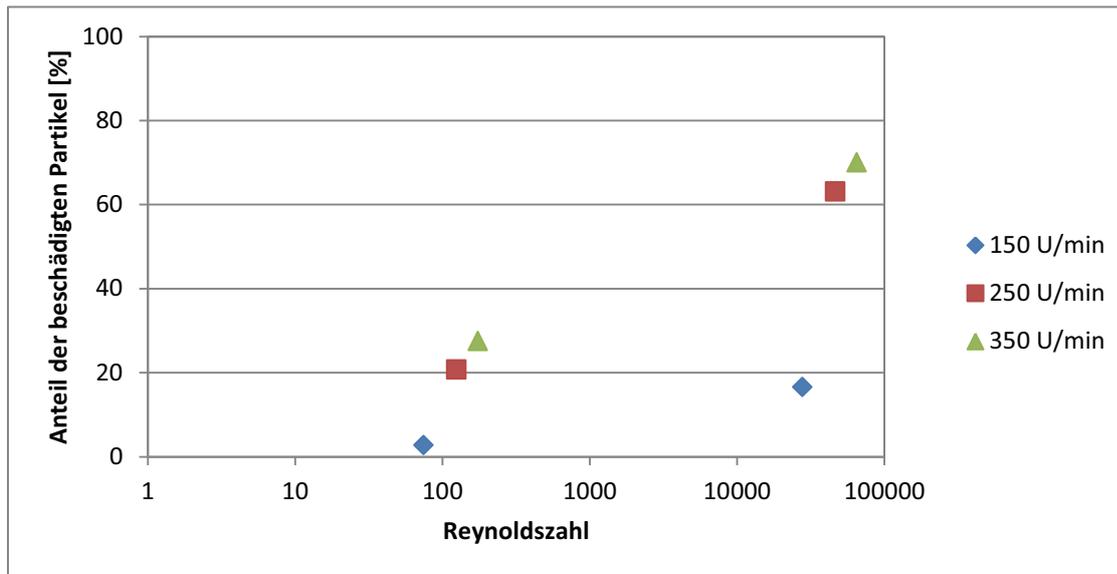


Abb. 46: Blattrührer \varnothing 106 mm - Anteil der beschädigten Partikel bei verschiedenen Drehzahlen und kontinuierlichen Phasen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl ($t=1$ min, Agarwürfel ($c=1,0$ %), kontinuierliche Phase: Wasser und Glucoselösung)

In Abb. 46 ist der Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl, der Drehzahl und der kontinuierlichen Phase dargestellt. Exemplarisch werden hierfür die drei Hauptdrehzahlen bei unterschiedlichen kontinuierlichen Phasen (Wasser und Glucoselösung) in das Diagramm eingefügt. Bei den linken drei Datenpunkten handelt es sich um Glucoselösung und bei den rechten drei Datenpunkten um Wasser als kontinuierliche Phase. Die Reynoldszahl ist bei gleicher Drehzahl von der Viskosität der kontinuierlichen Phase abhängig. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Beschädigung sowohl mit Erhöhung der Drehzahl, als auch mit Zunahme der Reynoldszahl zunimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die Turbulenz der Strömung einen entscheidenden Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel hat.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Versuche haben gezeigt, dass die Übertragung der bereits vorliegenden Ergebnisse aus der Emulsionstechnik, Bioverfahrenstechnik oder Untersuchungen von Flockensystemen nicht auf die Beanspruchung scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess möglich ist. Bei den bisherigen Untersuchungen wird die Größe der Partikel nicht berücksichtigt und es handelt sich um vollständig andere Stoffsysteme.

Durch die Texturmessung der Agarwürfel/-kugeln vor Versuchsbeginn konnte gezeigt werden, dass Agar als Referenzprodukt für Frucht- und Gemüsestücke durchaus geeignet ist, da die Festigkeit von aufgetauten Fruchtwürfeln durch unterschiedliche Konzentrationen der Agarlösung eingestellt werden konnte. In der vorliegenden Arbeit erfolgte der Vergleich der Rührorgane ausschließlich über die Drehzahl. Bei den Versuchen zur Charakterisierung der Rührorgane wurde der Anteil der beschädigten Partikel in Abhängigkeit von der Rührzeit bestimmt, wobei alle übrigen Parameter (Drehzahl, Form der Partikel, Konzentration der Partikel, Viskosität der kontinuierlichen Phase) identisch waren. Hierbei stellte sich der 4-Blattrührer als der scherintensivste Rührer heraus, dicht gefolgt vom Blattrührer (\varnothing 106 mm) und vom Ankerrührer. Die 4-Blattrührer eckig, oval und oval 45° zeigten eine geringere Beanspruchung der Partikel. Als die scherärmsten Rührer erwiesen sich der Blattrührer (\varnothing 81 mm) und der Propellerrührer.

Die Veränderung des Anteils an Agarwürfeln im Rührprozess hatte einen entscheidenden Einfluss auf deren Beanspruchung. Durch die Erhöhung des Anteils an Agarwürfel kam es zu einer Erhöhung der Beanspruchung. Bei den Agarkugeln war dieses Verhalten allerdings erst ab einem Anteil von 66,67 % zu beobachten. Durch die unterschiedliche Form des Agars war mit bloßem Auge bereits ein unterschiedliches Strömungsverhalten zu beobachten. Bei der Variation des Anteils an Agars stellte sich der Ankerrührer als der scherärmste Rührer heraus. Der Propeller- und Blattrührer (\varnothing 106 mm) verursachten eine stärkere Beanspruchung der Partikel.

Um den Einfluss der Festigkeit des Agars auf die Beanspruchung der Partikel zu untersuchen, wurde die Konzentration des Agars variiert. Bei diesen Versuchen wurde eine Zunahme der Beanspruchung der Partikel mit Abnahme der Festigkeit der Agarwürfel beobachtet.

Als letztes wurde die Viskosität der kontinuierlichen Phase an die Viskosität einer Fruchtzubereitung angepasst um den Rührprozess an reale Bedingungen anzupassen. Die erlangten Ergebnisse entsprachen nicht den vorangestellten Erwartungen. Durch die Erhöhung der Viskosität wurde der Anteil der beschädigten Partikel verringert. Der Ankerrührer stellte sich hierbei als der scherintensivste Rührer heraus, der Blattrührer (\varnothing 106 mm) als scherärmer. Als der scherärmste Rührer erwies sich in diesem Versuch wieder der Propellerrührer.

Die erlangten Ergebnisse sind auf scherempfindliche Stoffsysteme, wie z.B. Frucht- und Gemüseswürfel, bezogen und können die Grundlage für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet darstellen. Die nachfolgenden Versuche sollten allerdings zusätzlich zur Drehzahl auch auf die Leistung bezogen werden. Beim gleichen Leistungseintrag verursachen großflächige, radial fördernde Rührer in der Emulsions- und Bioverfahrenstechnik die kleinste Beanspruchung - axial fördernde Rührer hingegen eine deutlich größere. Das langfristige Ziel ist, vertiefte Erkenntnisse über die Beanspruchungsmechanismen scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess zu erlangen und dadurch eine optimierte, rührtechnische Herstellung von Produkten mit groben, scherempfindlichen Bestandteilen zu ermöglichen. Darüber hinaus sollen die erlangten Kenntnisse zur optimierten Gestaltung von scherarmen Rührorganen genutzt werden.

7 Zusammenfassung

Mischen und Rühren zählen zu den verfahrenstechnischen Grundaufgaben in der Lebensmittelindustrie. Dabei sollen verschiedenartige Stoffe mithilfe von mechanischen Energieeinträgen zu einem gleich verteilten Gemisch vereint werden. Enthalten diese Gemische allerdings scherempfindliche, grobstückige Komponenten, wie z.B. Frucht- und Gemüsewürfel, so kann intensives Rühren zu einer Schädigung dieser Partikel führen. Da die Unversehrtheit der Partikel ein entscheidendes Qualitätskriterium in der Lebensmittelindustrie darstellt, soll die Form und Kantigkeit der Partikel erhalten bleiben. Ziel dieser Arbeit ist es, die Scherbeanspruchung im Rührprozess in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern zu ermitteln. Welche Mechanismen für die Beanspruchung von Partikeln im Rührprozess verantwortlich sind, ist bislang nicht bekannt. Dabei besteht die Möglichkeit, dass die Beschädigung der Partikel durch die in die Strömung induzierten Scherkräfte entsteht. Des Weiteren könnten Partikel-Partikel-Wechselwirkungen, Strömungsform oder die Stoßbeanspruchung durch das Rührorgan der Grund für die Beanspruchung sein. Bis heute wurden lediglich Untersuchungen zur Tropfenbeanspruchung in Emulsionssystemen, Zellbeanspruchung in der Bioverfahrenstechnik und Versuche zur Beanspruchung von Flockensystemen durchgeführt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die Beanspruchung scherempfindlicher Partikel im Rührprozess ist jedoch nicht möglich, da die Größe der Partikel nicht berücksichtigt wird und es sich um vollständig andere Stoffsysteme handelt. Durch diese Arbeit sollen die Beanspruchungsmechanismen scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess charakterisiert werden. Hierfür wäre es wichtig zu wissen, inwieweit die Viskosität der kontinuierlichen Phase, der Anteil der Partikel im Rührprozess, sowie die Festigkeit der Partikel einen Einfluss auf die Beanspruchung der Partikel haben.

Die Texturmessung der Frucht- und Agarwürfel zeigte, dass Agar als Referenzprodukt geeignet ist. Die nachfolgenden Versuche wurden ausschließlich optisch ausgewertet und dienten der Charakterisierung der Rührorgane. Beim Vergleich über die Drehzahl (250 U/min) stellte sich der 4-Blattrührer gr. eckig als der scherintensivste Rührer heraus, dicht gefolgt vom Blattrührer (\varnothing 106 mm) und vom Ankerrührer. Die 4-Blattrührer eckig, oval und oval 45° zeigten eine geringere Beanspruchung der Partikel. Als die scherärmsten Rührer stellten sich der Blattrührer (\varnothing 81 mm) und der Propellerrührer heraus. Erhöht man den Anteil der Agarwürfel im Rührprozess, so erhöht sich auch die Beanspruchung der Partikel. Mit Abnahme der Festigkeit der Agarwürfel kommt es zur Zunahme der Beanspruchung der Partikel. Durch

die Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase wurde der Anteil der beschädigten Partikel verringert.

Die Ergebnisse können zum Einstellen von Rührprozessen mit großen scherempfindlichen Partikeln genutzt werden, was bedeutet, dass die Prozessparameter so eingestellt werden können, dass eine Beschädigung der Partikel vermieden werden kann.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strömungsbild unterschiedlicher Rührorgane (Knoch 2000).....	5
Abb. 2: Effektivwerte der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit (Lohr 1975).....	6
Abb. 3: Schematische Darstellung der Schwankungsgeschwindigkeit (Wille 2000)	6
Abb. 4: Kaskadenartiger Zerfall der Makrowirbel (Bodenschatz 2009).....	8
Abb. 5: Schergefälle in einem Fluidelement (Pahl, Gleißle, Laun 1991)	9
Abb. 6: Fettkugelzerfall beim Homogenisieren (Kessler 1992)	12
Abb. 7: Bild und schematische Abbildung des Versuchsstandes.....	20
Abb. 8: Bilder der verwendeten Rührer	21
Abb. 9: Agarplatte nach dem Gießen und Abkühlen	24
Abb. 10: Herstellen der Agarwürfel mit einem Teigschneider	24
Abb. 11: Versuchstand für die Herstellung der Agarkugeln.....	25
Abb. 12: Herstellung der Agarkugeln	26
Abb. 13: Prüfgeometrie des Winopal Texture Analysers	26
Abb. 14: Kraft-Weg-Diagramm für einen Agarwürfel $c=1,0\%$	27
Abb. 15: Rührblätter des modifizierbaren Rührorgans	28
Abb. 16: Viskositätsfunktion der kontinuierlichen Phase.....	30
Abb. 17: Kategorien der Agarwürfel nach der Scherbeanspruchung.....	31
Abb. 18: Fraktionen der Agarwürfel nach dem Grad ihrer Beschädigung	32
Abb. 19: Normalspannung beim Aufbrechen der Agar- und Fruchtwürfel	33
Abb. 20: Ankerrührer - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser.....	35
Abb. 21: Ankerrührer - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser.....	36
Abb. 22: Blattrührer \varnothing 106 mm - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser ...	37
Abb. 23: Blattrührer \varnothing 81 mm - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser	38
Abb. 24: Propellerrührer - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser	39
Abb. 25: Alle Rührer, 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser).....	40
Abb. 26: Blattrührer \varnothing 106 mm - $t=10$ min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser.....	41
Abb. 27: Vergleich der Rührer - Agarwürfel ($c=1,0\%$), $t=10$ min, kont. Phase: Wasser	42
Abb. 28: 4-Blattrührer oval - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser.....	44
Abb. 29: 4-Blattrührer eckig - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser	44
Abb. 30: 4-Blattrührer gr. eckig - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser... ..	44
Abb. 31: 4-Blattrührer oval 45° - 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser ...	45
Abb. 32: Rührervergleich: 250 U/min, Agarwürfel ($c=1,0\%$), kont. Phase: Wasser.....	47
Abb. 33: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit von der Agarkonzentration (anhand der Drehzahl) 49	

Abb. 34: Grenzdrehzahl in Abhängigkeit von der Agarkonzentration (Vergleich anhand der Umfangsgeschwindigkeit).....	50
Abb. 35: Untersch. Anteil der Agarwürfel/-kugeln im Rührbehälter (Blattrührer 106 mm, 150 U/min, t=20 min, Agar (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser)	51
Abb. 36: Untersch. Anteil der Agarwürfel (t=20 min, 150 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser)	53
Abb. 37: Untersch. Anteil der Agarkugeln (t=20 min, 150 U/min, Agarkugeln (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser)	54
Abb. 38: Blattrührer Ø 106 mm – Untersch. Festigkeit (250 U/min, Agarwürfel, kont. Phase: Wasser).....	55
Abb. 39: Propellerrührer - Untersch. Festigkeit (250 U/min, Agarwürfel, kont.Phase: Wasser)	56
Abb. 40: Ankerrührer - Untersch. Festigkeit (250 U/min, Agarwürfel, kont. Phase: Wasser)	57
Abb. 41: Rührervergleich - Untersch. Festigkeit (250 U/min, t=10 min, Agarwürfel, kont. Phase: Wasser)	58
Abb. 42: Blattrührer Ø 106 mm - 250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser und Glucoselösung	59
Abb. 43: Propellerrührer - 250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser und Glucoselösung	60
Abb. 44: Ankerrührer - 250 U/min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser oder Glucoselösung	61
Abb. 45: Rührervergleich - 250 U/min, t=10 min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont.Phase: Wasser oder Glucoselösung	62
Abb. 46: Blattrührer Ø 106 mm - t=1 min, Agarwürfel (c=1,0 %), kont. Phase: Wasser und Glucoselösung	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verwendetes Material	18
Tab. 2: Daten der verwendeten Rührer	21
Tab. 3: Reynoldszahl der verwendeten Rührorgane für Wasser als kontinuierliche Phase	22
Tab. 4: Reynoldszahl der verwendeten Rührorgane für Glucoselösung	22
Tab. 5: Rezeptur der Agarlösung	23
Tab. 6: Rezeptur einer Standardfruchtzubereitung (DIL)	29
Tab. 7: Blattgeometrie verschiedener Rührer	43

Literaturverzeichnis

Abu-Reesh I., Kargi F.: Biological responses of hybridoma cells to defined hydrodynamic shear stress. J. Biotechnol. 9, S. 167-178, 1989

Biedermann A.: Scherbeanspruchung in Bioreaktoren. Dissertation Universität Köln, 1994

Bodenschatz E.: Forschungsbericht: Göttinger Hochdruck-Turbulenz-Anlage. Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, 2009

Brunn O.: Modellierung des dreidimensionalen Strahlungswärmeaustauschs in Verbrennungs-räumen mittels Monte Carlo Methode. Karlsruhe: Dissertation Technische Hochschule, 2010

DIL: Abschlussbericht: Optimieren von Rührprozessen in der Verarbeitung scherempfindlicher Stoffsysteme über den Einsatz verbesserter Rühraggregate. Quakenbrück, 1999

Geisler R. K.: Fluidodynamik und Leistungseintrag in turbulent gerührten Suspensionen. München: Dissertation am Lehrstuhl B für Verfahrenstechnik der TU München, 1991

Hemming W., Wagner W.: Verfahrenstechnik. 10.Aufl. Würzburg: Vogel Industrie Medien 2008

Henzler H.-J., Biedermann A.: Modelluntersuchungen zur Partikelbeanspruchung in Reaktoren. Chem. Ing. Tech. (68), S.1546-1561, 1996

Herrmann K.: Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in turbulenten Vormischflammen. Zürich: Dissertation ETH Nr. 14952, 2002

Hoffmann J., Tralles S., Hempel D.C.: Testsystem zur Untersuchung der mechanischen Beanspruchung von Partikeln in Bioreaktoren. Chem. Ing. Tech. 64 (10):953, 1992

Hooker B.S., Lee J., An G.: Vessel: Effect of impeller design. Biotech. and Bioeng. 35, 1990

Kennedy R.A.: Factors affecting shear in stirred tanks. Master of Science Thesis, Cornell University. Ithaca USA, 1967

Kessler H.-G.: Food and bio process engineering: dairy technology. München: A.Kessler, 2002

Kipke K.: Technologie von Salben, Suspensionen und Emulsionen. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft GmbH, 1984

Knoch A.: Biegebeanspruchung von Rühraggregaten. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn: Shaker Verlag, 2000

Kramer H.W.: Der Einfluss von Scherkräften in Bioreaktoren auf Proliferation und Syntheseleistung tierischer Zellen. Dissertation Nr.8665, ETH Zürich, 1980

Langer G., Deppe A.: Zum Verständnis der hydrodynamischen Beanspruchung von Partikeln in turbulenten Rührerströmungen. Chem. Ing. Tech. (72) S.31-41, 2000

Liepe F., Sperling R., Jembere S.: Rührwerke: Theoretische Grundlagen, Auslegung und Bewertung. 1.Aufl. Köthen: Eigenverlag Fachhochschule Köthen, 1998

Märkl H., Bronnenmeier R., Wittek B.: Rheologie und mechanische Beanspruchung biologischer Systeme: Dynamische Belastbarkeit von Mikroorganismen. VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, GVC, Tübingen, 25./26.Mai 1987

Mersmann A., Grossmann H.: Dispergieren im flüssigen Zweiphasensystem. München: Technische Universität, 1978

Mersmann A., Grossmann H.: Dispergieren im flüssigen Zweiphasensystem. Chem. Ing. Tech. 52, 1980

Metzner A. B., Otto R. O.: Agitation of non-newtonian Fluids. A.I.Ch.E.J 3 (1) S.3-11, 1957

Metzner A. B., Feehs R. H., Ramos H. L., Otto R. O., Tuthill J. D.: Agitation of visous newtonian and non-Newtonian fluids. A.I.Ch.E.J. 7 (1) S.3-9, 1961

Midler M., Finn R.K.: A modell system for evaluating shear in the design of stirred fermentors. Biotechn. Bioeng. (8), 1966

Pahl M.H., Gleißle W., Laun H.-M.: Kunststofftechnik – Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1991

Pahl M. H., Kraume M., et al: Verfahrenstechnik in der Praxis – Mischen und Rühren. Düsseldorf: VDI/GVC-Tagungsband 23./24. November Baden-Baden, 1998

Polke R., Rädle M., Scholz N.: Partikelmeßtechnik-Status, Trend, Bedarf. Chem. Ing. Tech. 65, 1993

Reuß M.: Untersuchungen zur mechanischen Schädigung von mycelbildenden Mikroorganismen in Rührfermentern: in Rheologie und mechanischen Beanspruchung. Vortragstagung München, 1987

Stieß M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1. 2.Aufl. Berlin: Springer, 1995

Stieß M.: Mechanische Verfahrenstechnik: Partikeltechnologie 1. 3.Aufl. Berlin: Springer, 2009

Tanaka H., Takahashi J., Ueda K.: A standard for the intensity of agitation shock on mycelia on agitation of mycelial suspensions. J. Ferment. Technol. 53:18, 35, 1975

Todtenhaupt E. K., Zeiler G., et al.: Handbuch der Rührtechnik. Schopfheim: EKATO Rühr- und Mischtechnik GmbH, 2000

Tramper D., Vlcek J.M.: Design parameters for cultivation of insect cells in bubble columns: Rheologie und mechanische Beanspruchung. Dissertation, Preprints in Tübingen, 1987

Truckenbrodt E.A.: Fluidmechanik Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Berlin: Springer Verlag, S.16, 2008

Van den Tempel M.: The effects of elongational flow during processing on product rheology. The Chemical Engineer (317) S.95-97, 1977

Voß H.: Bioreactors. Ullmann Enzyklopädie Bd. 1, 1992

Wille M.: Zum Einfluss makroskopischer Dehnströmungen auf die Tropfenbeanspruchung beim Flüssig/Flüssig-Dispergieren in turbulenten Rührströmungen. Aachen: Shaker Verlag, 2000

Wollny S.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Partikelbeanspruchung in gerührten (Bio-) Reaktoren. Dissertation TU Berlin, 2010

Wollny S., Sperling R.: Partikelbeanspruchung in gerührten Behältern. Chem. Ing. Tech. 79 (3) S.199-208, 2007

Wutke M.: Untersuchungen zur Schädigung von tierischen Zellen durch mechanische Beanspruchung. Dissertation, Universität Hannover, 1988

www.lebensmittellexikon.de/a0000120.php (18.04.2012, 14:22 Uhr)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Weiterhin erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

A. Kraft

Anna-Lena Kraft

Quakenbrück, den 30. Juni 2012