

Versuchs- und Lehranstalt  
für Brauerei in Berlin e.V.



**VLB**  
BERLIN

*Forschungsthema:*

## Scherkraftquantifizierung

*AiF-Vorhaben-Nr.:*

VF130017

*Name der Forschungsstelle(n):*

Forschungsinstitut für Bier- und Getränkeproduktion (FIBGP)

*Kontakt:*

Dr.-Ing. Roland Pahl, pahl@vlb-berlin.org

*Bewilligungszeitraum:*

1.7.2013 – 31.8.2015



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# SCHLUSSBERICHT



WISSEN  
SCHAFFT  
QUALITÄT

## **Impressum**

### **Herausgeber:**

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.  
Forschungskoordination - Gerhard Andreas Schreiber  
Seestraße 13, 13353 Berlin, Deutschland

Vereinsregister-Nr.: 24043 NZ, Amtsgericht Berlin-Charlottenburg

[www.vlb-berlin.org](http://www.vlb-berlin.org)

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Alle Rechte vorbehalten, sofern nicht im Text nicht anders angegeben.

Kein Teil des Berichts darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen in Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

All rights reserved (including those of translation into other languages).

No part of this book may be reproduced in any form.

**Reg.-Nr.:** VF130017  
**Kurztitel:** Scherkraftquantifizierung  
**Laufzeit:** 01.09.2013 bis 30.11.2015

<p>Name und Anschrift des Zuwendungsempfängers:</p> <p>VLB Berlin e.V.   Seestraße 13   13353 Berlin</p>
<p>Kurzfassung (Zielstellung, Ergebnisse)</p> <p>Die Zielstellung des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Modells zur Quantifizierung und Evaluierung des Scherkrafteintrags in brauereirelevante Medien. Als Versuchsmedien sollten dabei ein eigens entwickeltes Beta-Glucan-Testfluid sowie eine Hefesuspension verwendet werden. Die messbaren Größen, die mit dem Scherkrafteintrag in Relation gebracht werden können, stellten beim Beta-Glucan-Fluid die prozentuale Gel-Bildung der Beta-Glucane, und bei der Hefesuspension der Anteil an Totzellen dar. Untersuchungsobjekte waren verschiedene Kreisel- und Verdrängerpumpen, wie sie standardgemäß in der Brauerei- und Getränkeindustrie Verwendung finden. Ziel war es, deren Scherkrafteintrag in das Testmedium anhand der oben genannten Parameter objektiv zu beziffern und damit eine neue scherkraftbezogene Pumpenkennlinie zu generieren.</p> <p>Die angegebenen Ziele konnten mit geringen Einschränkungen erreicht werden. Die Hefesuspension hat sich als generell ungeeignet erwiesen, um eine Scherkraftbeanspruchung zu quantifizieren, da sich die Viabilität auch durch eine starke Scherung nicht signifikant beeinflussen ließ. Unter diesem Gesichtspunkt wurde ausschließlich der Ansatz mit Gersten-<math>\beta</math>-glucan verfolgt. Die unterschiedlichen Pumpen haben aufgrund ihrer verschiedenen Bauarten unterschiedlich starke Scherkräfte in das Versuchsmedium eingebracht, was sich in einer unterschiedlich stark ausgeprägten Gelbildung innerhalb des Testmediums widerspiegelte. Es konnten mit der entwickelten Methodik diverse Aspekte deutlich gemacht werden, die zu einer Schonförderung beitragen, bzw. diese verschlechtern. Exemplarisch wurde für eine Pumpe eine Scherkraftkennlinie entwickelt, welche die Scherbeanspruchung auf das Medium bei verschiedenen Betriebspunkten der Pumpe beziffern kann. Einschränkungen ergaben sich bezüglich der Wiederholbarkeit der Versuche, da sich während des Verlaufs der Forschungsarbeit gezeigt hat, dass eine große Vielzahl an Parametern existiert, die neben dem eigentlichen Scherkrafteintrag eine Auswirkung auf den Gelbildungsprozess haben, und nicht alle dieser Parameter zu jetzigem Zeitpunkt in ausreichendem Umfang standardisiert werden konnten.</p>
<p>Veröffentlichungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Quantification and evaluation of the impact of shear forces in brewery relevant media“, Brauereiforum International, 2/2014</li> <li>• „Quantification Of Shear Forces“, Brewing and Beverage Industry International 2/2015              → Übersetzung ins Deutsche und Chinesische (Brauindustrie, Sachon Verlag)</li> <li>• Vortrag: „Neue Methoden zur Quantifizierung des Scherkrafteintrags durch Pumpen“, 9. VLB-Seminar für die Brau- und Getränkeindustrie in Russland, Moskau, 2013</li> <li>• Vortrag: „Ansätze zur Quantifizierung des Scherkrafteintrags in brauereirelevante Medien“, 101. Brau- und Maschinentechnische Arbeitstagung, Donaueschingen, 2014</li> <li>• Vortrag: „Approaches to quantify shear stress in brewery relevant media“, 5th Iberoamerican VLB Symposium, Madrid, 2014</li> <li>• Vortrag: „Investigations of shear forces and biofilms in the brewery“, 6th Ibero-American VLB Symposium, Itupeva, 2015</li> <li>• Vortrag: “Quantification of the ingress of shear forces by pumping operations – Project presentation and results”, 11th VLB Seminar for the Malting and Brewing Industry in Russia, Moskau, 2015</li> <li>• Vortrag: „Neue Erkenntnisse zur schonenden Förderung von Würze und Bier“, 22. Dresdner Brauertag, Dresden, 2016</li> </ul>

**20. Mai 2016**

Datum

  
 \_\_\_\_\_  
 Projektleiter

  
 \_\_\_\_\_  
 Rechtsverbindliche Unterschrift

# Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis

zu FuE Vorhaben

<b>Reg.-Nr.:</b>	<b>VF130017</b>
<b>FuE-Einrichtung:</b>	<b>Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.</b>
<b>Titel:</b>	<b>Scherkraftquantifizierung</b>
<b>Projektlaufzeit:</b>	<b>01.09.2013 bis 30.11.2015</b>

Berlin, den **20. Mai 2016**

Name und Telefonnummer des Projektleiters: Dr.-Ing. Roland Pahl (030 / 450 80 238)

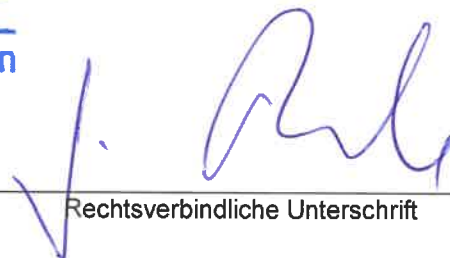
Versuchs- und Lehranstalt  
für Brauerei in Berlin

**VLB**

Firmenstempel **Seestraße 13 • D-13353 Berlin**



Unterschrift des Projektleiters



Rechtsverbindliche Unterschrift

# 1 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Um objektive Aussagen über die durch Pumpen und Strömungen verursachte Scherkraftbelastung treffen zu können, ergab sich als Zielstellung dieses Forschungsvorhabens die Entwicklung eines Modells zur Quantifizierung und Evaluierung des Scherkrafteintrags in brauereirelevante Medien. Dabei sollten Scherkräfte in geeignete Testmedien eingebracht werden, an denen die Auswirkungen reproduzierbar bewertet werden können.

Die Zunahmen an Gel in einem  $\beta$ -Glucan-Medium, bzw. die steigende Anzahl an Totzellen in einem Hefetestmedium stellen messbare Größen dar, welche – zunächst im Labor, später im Pilotmaßstab – eine quantitative Erfassung der Scherkraftbelastung ermöglichen sollten. Es sollte eine Teststrecke konstruiert werden, an der sowohl verschiedene Pumpen, als auch verschiedene Strömungsparameter in Hinblick auf ihren Scherkrafteintrag in das Medium getestet werden können. Eine Scherkraftmischpumpe sollte dabei durch maximale Belastung den Ausgangswert für weitere Untersuchungsgegenstände bilden. Die folgenden in der Brauerei- und Getränkeindustrie allgegenwärtigen Pumpentypen sollten im Laufe des Vorhabens auf ihren Scherkrafteintrag untersucht werden:

- Normalsaugende Kreiselpumpen
- Selbstsaugende Kreiselpumpen
- Drehkolbenpumpen
- Exzentrerschneckenpumpen

Anhand der erworbenen Ergebnisse aus diesen Versuchen sollten Kennzahlen für den Scherkrafteintrag von Pumpen entwickelt werden. Die Pumpe mit dem geringsten messbaren Scherkrafteintrag in das Medium sollte für weitere Untersuchungen im Hinblick auf den Einfluss von Strömungsgeschwindigkeiten verwendet werden.

Als Ergebnisform sollte ein Modell entwickelt werden, welches die Quantifizierung und Evaluierung des Scherkrafteintrags auf brauereirelevante Medien ermöglicht. Es bestand aus folgenden Einzelzielen:

- Entwicklung und Optimierung eines geeigneten  $\beta$ -Glucan-Testmediums und eines geeigneten Hefetestmediums
- Evaluierung der kolorimetrischen Schnelltestmethode zur Bestimmung der Gelbildung im  $\beta$ -Glucan-Testmedium im Vergleich zur fluorimetrischen Referenzmethode

- Inbetriebnahme der eigens konstruierten Teststrecke zur standardisierten Untersuchung von Pumpen und Strömungsparametern im jeweiligen Testmedium
- Entwicklung einer Scherbelastungskennlinie zusätzlich zu den leistungsbezogenen existierenden Pumpenkennlinien

## **2 Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse**

Um die Darstellung der Vorhabensergebnisse zu vereinfachen, werden die in Abschnitt 1 angegebenen Einzelziele zum Teil in weitere Unterziele, bzw. Methoden unterteilt. Eine Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den ausgegebenen Zielstellungen erfolgt in Abschnitt 3.

### **2.1. Entwicklung und Optimierung eines geeigneten Beta-Glucan-Testmediums und eines geeigneten Hefetestmediums**

- Beta-Glucan-Testmedium

Gersten-Beta-Glucan ist in verschiedenen Reinheitsgraden in Pulverform entweder als Kalibrierstandard für Analysemethoden oder als Nahrungsergänzungsmittel erwerblich. Es musste also zunächst getestet werden, welcher Reinheitsgrad sich für die im Vorhaben geplanten Versuche aus Gesichtspunkten der Durchführbarkeit im Sinne der Löslichkeit und des Gelbildungsvermögens am ehesten eignet. Getestet wurden ein Produkt mit 25% Reinheit, eines mit 75% und eines mit 95% Reinheit. Das Produkt mit der geringsten Reinheit konnte aufgrund eines zu hohen Anteils an unlöslichen Stoffen gleich zu Beginn für eine weitere Verwendung ausgeschlossen werden. Der Umgang mit dem hochreinen Pulver gestaltete sich ebenso als schwierig. Aufgrund seines sehr schlechten Löslichkeitsvermögens, hoher Viskosität und schlechtem Gelbildungspotenzial wurde auch auf die weitere Verwendung des 95-prozentig reinen Präparats verzichtet. Alle weiteren Untersuchungen wurden mit dem Beta-Glucan-Pulver in 75-prozentiger Reinheit durchgeführt. Es zeigte geeignete Löslichkeitseigenschaften und reproduzierbares Gelbildungsverhalten. Dabei konnten bis zu 10 Gramm Beta-Glucan pro Liter Wasser gelöst werden. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Löslichkeit von Gersten- $\beta$ -Glucan in Wasser ohne weitere Zusätze als schwierig angesehen werden kann. Zur besseren Handhabung würde sich dementsprechend eine weitaus geringere Konzentration im Testmedium eher eignen. Da die Gelbildung aber neben anderen Faktoren auch vom zur Verfügung stehenden Reaktionsraum abhängt, bot es sich an, mit der am höchsten noch handhabbaren Konzentration zu arbeiten. Versuchsergebnisse zur Konzentrationsabhängigkeit und weitere allgemeine Laboruntersuchungen am  $\beta$ -Glucan-Testmedium sind in Anhang 7.1 dargestellt. Der Versuchsaufbau in den Laborscherversuchen beschränkte sich auf einen Stabmixer für den professionellen Gastronomiebedarf, der an einem Stativ befestigt in ein Becherglas mit 3 L Testmedium eingetaucht wurde. Weiterhin hat sich gezeigt, dass zur Herstellung des Testfluids hohe Temperaturen notwendig sind. So wurde eine Herstellungstemperatur von 95 °C gewählt, um den Lösungsvorgang bestmöglich zu beschleunigen aber zur Schaumvermeidung noch unter dem Wassersiedepunkt zu bleiben. Aufgrund der zuvor erwähnten vergleichsweise schlechten Löslichkeit des  $\beta$ -Glucan-Produkts, war eine geringe Scherung während der Herstellung des

Testmediums in Form von Röhren (20 Minuten bei  $800\text{min}^{-1}$ ) mittels Magnetrührer im Labor- und Kreislaufförderung (2,5 Stunden, normalsaugende Kreiselpumpe, frequenzgeregelt auf  $4,5\text{ m}^3/\text{h}$  mit  $1300\text{ min}^{-1}$ ) im Pilotmaßstab nicht zu vermeiden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese Scherung bei den hohen Temperaturen keine Gelbildung im Testfluid induzierte. Als weitere Anpassung des Testmediums ist eine Absenkung des pH-Wertes mittels 8,5-prozentiger Ortho-Phosphorsäure zu nennen. So wurde vor jedem Scherversuch ein pH-Wert von 3 im Testmedium eingestellt, um die in der Theorie davon abhängige Ausbildung der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen  $\beta$ -Glucan-Molekülen zu fördern, beziehungsweise die äußeren Bedingungen dafür zu standardisieren.

- Hefe-Testmedium

Bereits in der vertieften Literaturrecherche zum Einfluss von Scherkräften auf die Hefeviabilität taten sich erhebliche Diskrepanzen auf. So beschreibt van Bergen [1] nebst ausgesprochen hohen Standardabweichungen in den Versuchsreihen einen Rückgang der viabilen Zellen um lediglich 3% nach einer dreistündigen Scherbelastung. Gleichzeitig ging dies jedoch mit einem Rückgang der Gesamtzellzahl um 26% einher, was auf ein Zerstören der kompletten Zelle durch die Scherung hindeutet. Nach Lange et al. [2] hingegen wurde auch bei höheren Scherbelastungen die Gesamtzellzahl nicht beeinflusst, wohingegen eine signifikante Abnahme an viabilen Zellen zu verzeichnen war. In eigenen Versuchen, in denen im Labormaßstab mittels Stabmixer (Gastronomiebedarf) Scherkräfte in eine Hefesuspension eingebracht wurden, zeichnete sich ebenso ein uneinheitliches Bild. Wie in Anhang 7.2 zu sehen, zeigen die drei Labor-Scherversuche, für die je eine neue Hefesuspension propagiert wurde, allenfalls Tendenzen in einer steigenden Prozentzahl an Totzellen. In Hinblick auf die fluktuierenden Gesamtzellzahlen ist diese leichte Tendenz jedoch als nicht aussagekräftig zu bewerten. Zusätzlich ist der Temperaturanstieg, der mit jeder Scherung einhergeht in Hinblick auf den Zustand eines Mikroorganismus als zu hohe Fehlerquelle anzusehen. Auch weil im Rahmen dieses Vorhabens eine Temperaturkontrolle in der Pilot-Teststrecke nicht vorgesehen war, wurde von der weiteren Verfolgung der Versuche mit Hefetestmedium abgesehen.

- Kieselsol-Testmedium

Um trotz der sehr eingeschränkten Verwendbarkeit des Hefe-Testmediums für die im Vorhaben angestrebten Ziele noch eine Alternative zum  $\beta$ -Glucan-Fluid zu haben, wurde Kieselsol als mögliches Testmedium in Laborscherversuchen untersucht. Die Grundüberlegung war, dass sich die Größenverteilung der Kieselsolpartikel durch den Eintrag von starken Scherkräften verändern könnte, indem die Partikel zerkleinert werden. Es wurde hierzu eine Kieselsolsuspension mit 10 Gramm



Kieselöl pro Liter destilliertem Wasser hergestellt. Diese wurde im Becherglas über eine Dauer von 60 Minuten mittels Stabmixer geschert, wobei eine Zwischenprobe nach 30 Minuten genommen wurde. Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilungen sind in Anhang 7.3 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Einwirkung des einstündigen Scherens der Probe, was bei der Verwendung des Beta-Glucan-Testmediums bereits eine erhebliche Gelbildung induzieren konnte, keine Auswirkung auf die mittels Microtrac Particle Size Analyzer gemessene Partikelgrößenverteilung in der Kieselölsuspension hatte. Der Ansatz, ein Kieselölmedium für weitere Versuche zu verwenden wurde demnach verworfen.

## **2.2. Evaluierung der kolorimetrischen Schnelltestmethode zur Bestimmung der Gelbildung im $\beta$ -Glucan-Testmedium im Vergleich zur fluorimetrischen Referenzmethode**

Grundsätzlich unterschieden sich bei allen Versuchen die Ergebnisse, die mittels colorimetrischem Schnelltest der Firma R-Biopharm AG (ehemals Nova Biotec® Dr. Fechter GmbH) ermittelt wurden, deutlich von denen, die mittels fluorimetrischer Referenzmethode durchgeführt wurden. Dieser Umstand trifft sowohl auf die absolute Beta-Glucan-, bzw. Beta-Glucan-Gel-Konzentration, als auch auf die prozentualen Werte zu. Erklärt werden kann dies durch zwei die Beta-Glucane betreffende Phänomene, die sich auch an anderen Stellen im weiteren Verlauf des Vorhabens deutlich gemacht haben. Zum einen wurde von Kupetz [3] nachgewiesen, dass die Mechanismen verschiedener Nachweismethoden für  $\beta$ -Glucan in unterschiedlichen Konzentrationen bei ein und derselben Probe resultieren. Dies liegt an der Affinität der unterschiedlichen Nachweismethoden zu verschiedenen Molekülgrößen innerhalb der  $\beta$ -Glucan-Fraktion. Abweichende Ergebnisse hinsichtlich der Beta-Glucan-Konzentration bei der Anwendung unterschiedlicher Analysemethoden sind also eher als Regel statt als Ausnahme zu betrachten. Demzufolge ist es auch fragwürdig eine bestimmte Methode als Referenzmethode zu betrachten. Darüber hinaus wurde die Dauer der Probenlagerung sowohl bei kalter (4°C), als auch bei Lagerung bei Raumtemperatur (21°C) als erheblicher Einflussfaktor auf die Gelbildung identifiziert. Aufgrund der Durchführung durch ein externes Labor, lagerten die Proben für die fluorimetrische Untersuchung jeweils einen Tag länger als die colorimetrisch untersuchten Proben. Damit kann der stets größere prozentuale Gelanteil bei den in Anhang 7.4 dargestellten mittels Fluorimetrie analysierten Proben erklärt werden. Aufgrund der wiederholbaren mittels Kolorimetrie generierten Ergebnisse, die über das komplette Vorhaben einen Zusammenhang zwischen den eingebrachten Scherkräften und der  $\beta$ -Glucan-Gelbildung im Testfluid nachweisen konnten, wurde die Verwendung dieses Verfahrens für den Zweck des Vorhabens unabhängig von den zur Fluorimetrie abweichenden Ergebnissen fortgeführt. Für die Vorhabensziele hat sich die Verwendungsmöglichkeit des Schnelltestverfahrens also bestätigt.

### **2.3. Inbetriebnahme der eigens konstruierten Teststrecke zur standardisierten Untersuchung von Pumpen und Strömungsparametern im jeweiligen Testmedium**

Die in Zusammenarbeit mit dem Anlagenbauer GEA Tuchenhagen GmbH konstruierte Pumpenteststrecke besteht, wie in Anhang 7.5 zu sehen, aus einem Vorratsbehälter mit 240 Litern Fassungsvermögen, von dem aus das Testmedium über Messsensoren und ein Rohrschleifenpaket durch eine austauschbare, frequenzgeregelte Pumpe im Kreislauf gefördert wird.

Die eingebauten Thermometer, das Manometer und der induktive Durchflussmesser dienen dabei zur Prozessüberwachung. Letzterer ist von besonderer Bedeutung, da er zur Bestimmung der Umwälzungen des Testmediums in der Anlage herangezogen wird. Diese errechneten sich über das zu einem vorher festgelegten Zeitpunkt geförderte Volumen, welches am Durchflussmesser abgelesen werden konnte, dividiert durch das gesamte vorgelegte Volumen des Testmediums. An dieser Stelle soll zum besseren Verständnis ein Beispiel angebracht werden. Wenn bei einem Gesamtvolumen von 170 L Testmedium nach 60 Minuten Scherdauer 10 m<sup>3</sup> gefördert wurden, so errechnen sich die Umwälzungen wie folgt:

$$Umwälzungen_{60min} = \frac{\text{gefördertes Volumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{10.000 \text{ L}}{170 \text{ L}} \approx 59 \text{ Umwälzungen}$$

Durch die Verwendung der Umwälzungen als Bezugsgröße konnte der Faktor Scherzeit aus den Betrachtungen herausgenommen werden, was bei der Betrachtung verschiedener Betriebspunkte einer Pumpe von besonderer Wichtigkeit war, So konnte wie folgend im Detail erläutert auch der durch Pumpenarbeit verursachte Scherkrafteintrag in ein langsamer gefördertes Fluid mit dem in ein schneller gefördertes Fluid verglichen werden. Wird das Fluid durch eine geringere Drehzahl der Pumpe oder durch eine Drosselklappe langsamer gefördert, als bei einer vergleichenden Untersuchung, so passiert das Medium bei einer festgelegten Zeit weniger häufig das eigentliche Untersuchungsobjekt, die Pumpe. Ein Vergleich wäre auf die Scherdauer bezogen so nicht möglich. Bezogen auf die Umwälzungen hingegen, können auch verschiedenste Fließgeschwindigkeiten miteinander verglichen werden.

Das Rohrschleifenpaket, bestehend aus 16 Rohren mit einem Durchmesser von 32 cm und einer Länge von je 1,9 Metern, diente einem schonenden Druckabbau innerhalb der Teststrecke. Dies war notwendig, um eine ausreichende statische Höhe zu generieren, um sich dem optimalen Betriebspunkt der Pumpen zu nähern. Die Anlagenkennlinie der Teststrecke ist in Anlage 7.6 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei einer Förderrate von 10 m<sup>3</sup>/h ein Druckverlust von 1,36 bar

(entspricht 13,6 m Höhe) generiert wurde. Um die Anlagenkennlinie auf die Pumpen anzupassen, wurde kurz vor Wiedereintritt der in den Vorratsbehälter eine Drosselklappe in die Rohrleitung integriert. Mit dem Schließungswinkel konnte der Druckverlustkoeffizient (Zeta-Wert) modifiziert werden und so die Anlagenkennlinie auf einen gewünschten Punkt verschoben werden. Ein Schließungswinkel von  $48^\circ$  erhöhte den Zeta-Wert der Drossel von 0 auf 26, was die Anlagenkennlinie so verschob, dass sie bei einer Förderrate von  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  einen Druckverlust von 2 bar (20 m Höhe) generierte. Dies entspricht der nominalen Auslegung (optimaler Betriebspunkt) der im Rahmen des Vorhabens untersuchten Pumpen.

Die Pumpe als Untersuchungsobjekt wurde über Schlauchverbindungen in die Teststrecke integriert. Da die Pumpen zum Teil in unterschiedlichen Größen und damit auch mit unterschiedlichen Saug- und Druckstutzendurchmessern zum Einsatz kamen, waren in einigen Fällen Erweiterungsstücke notwendig, um die Pumpe an die in DN40 dimensionierten Schlauchverbindungen anzuschließen. Um eventuelle durch die zusätzlichen Einbauten hervorgerufene Kavitation im Pumpenkopf und damit einen zusätzlichen Scherkräfteintrag zu vermeiden, wurde vor jeder Pumpe ein gerades Rohrstück integriert, welches in seiner Länge dem Dreifachen des Durchmessers des Saugstutzens entsprach. Mit dieser Beruhigungsstrecke wurde sichergestellt, dass das Medium blasenfrei in den Pumpenkopf eintreten konnte. Somit konnte der Einflussfaktor der Kavitation auf die Gelbildung ausgeschlossen werden.

#### **2.4. Entwicklung einer Scherbelastungskennlinie zusätzlich zu den leistungsbezogenen existierenden Pumpenkennlinien**

Wie in sämtliche Pumpenversuchen (siehe Anhänge) zu sehen, folgte der Verlauf der  $\beta$ -Glucan-Gelbildung stets einem spezifischen Muster. So war eine bestimmte Anzahl an Umwälzungen des Mediums in der Teststrecke nötig, um eine Gelbildung überhaupt zu induzieren. Dies war gefolgt von einem oft steilen Anstieg des prozentualen Gelanteils im Medium, welches ab einem gewissen Punkt stagnierte und häufig in einem leichten Rückgang des Gelanteils mündete. Die generelle Form dieser Gelbildungskurven war bei allen untersuchten Pumpen gleich, sie unterschieden sich jedoch in ihrer Ausprägung. Grundsätzlich konnten die Kurven so gedeutet werden, dass je später die Gelbildung einsetzte, je später das Maximum erreicht war, und je niedriger das Maximum lag, desto schonender war die Pumpenarbeit zu beurteilen. Da alle Gelbildungskurven in ihrer Form den gleichen Grundcharakter aufwiesen, wurde als Berechnungspunkt für die Scherkraftkennzahlen aus denen die Scherbelastungskennlinie besteht, der Punkt gewählt, an dem die Kurve stagnierte, beziehungsweise an dem ihr Maximum erreicht war. An diese Stelle wurde die prozentuale Gelbildung durch die

Anzahl der Umwälzungen dividiert. An dieser Stelle soll die Berechnung der Kennzahlen anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Wie in Anhang 7.9 zu sehen erreicht die die prozentuale Gelbildung ein Maximum von 66 % nach 234 Umwälzungen. Die Scherkraftkennzahl berechnet sich für diesen Fall wie im Folgenden dargestellt:

$$\text{Scherkraftkennzahl} = \frac{\text{Gelbildung max}}{\text{Umwälzungen}_{\text{Gelbildung max}}} = \frac{66\%}{234 \text{ Umw.}} \approx 0,28 \frac{\%}{\text{Umw.}}$$

Durch diese Berechnung wurde stets ein Wert zwischen 0 und 1 generiert. Je kleiner dieser Wert, desto geringer ist der Scherkräfteintrag und desto schonender ist die Pumpenarbeit zu beurteilen. Durch eine Berechnung auf diese Art und Weise werden alle veränderlichen Eigenschaften in den Gelkurven miteinbezogen. Dieses Vorgehen wurde allerdings erst gegen Ende des Vorhabens entwickelt, wodurch in den anfänglichen Versuchen teils zu wenige Messpunkte vorhanden waren, um den genannten Punkt exakt zu bestimmen. Als Methodik für die Bezifferung des Scherkräfteintrags kann es jedoch problemlos angewendet werden, da lediglich die Probenahmezeitpunkte exakt gewählt werden müssen.

Um zu den genannten Erkenntnissen zu gelangen, mussten - wie geplant - verschiedene Pumpentypen in der Teststrecke untersucht werden. Die Durchführung eines Scherversuchs bestand dabei aus dem Herstellen des  $\beta$ -Glucan-Testmediums, dem eigentlichen Scherversuch am Folgetag um ein schonendes Abkühlen des Mediums zu gewährleisten, und der Auswertung der während des Versuchs genommenen Proben am dritten Tag. Die Proben lagerten dabei zunächst über Nacht in einem auf 21°C temperierten Raum. Diese Abfolge musste aufgrund einiger Beobachtungen und Ergebnisse im Laufe des Vorhabens verändert werden. Zu gegebener Stelle wird dies genauer erläutert.

- Scherkraftmischpumpe

Zunächst wurden zwei Betriebspunkte einer Scherkraftmischpumpe verglichen. Dieser Pumpentyp ist zur gleichzeitigen Förderung und Mischung verschiedener Medien, bzw. zum Herstellen von Dispersionen konstruiert und erzeugt somit gewollt erhöhte Scherkräfte. Damit bildete die Scherkraftmischpumpe einen ersten Vergleichswert für die Untersuchungen der wesentlich schonender arbeitenden Kreisel- und Verdrängerpumpen, deren Untersuchungen im späteren Verlauf des Vorhabens folgen sollten. Außerdem bestätigten die Tests mit der Scherkraftmischpumpe die allgemeine Funktionalität der Beta-Glucan-Gel-Erzeugung innerhalb der Pumpenteststrecke. Die Ergebnisse für die beiden untersuchten Betriebspunkte bei 2400 und 1800 min<sup>-1</sup> sind in Anhang 7.7 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei höherer Drehzahl schon nach 40 Umwälzungen ein deutlicher Anstieg des Gelanteils im Testmedium zu verzeichnen war. Nach bereits 65 Umwälzungen waren

über 50 % des in der Lösung vorhandenen Beta-Glucans in den Gelzustand übergegangen. Wurde die Drehzahl der Pumpe verringert, was von Natur aus eine geringere Scherung mit sich bringt, so verschob sich das Einsetzen der Gelbildung und erst nach ca. 60 Umwälzungen war ein signifikanter Anstieg des Gelanteils zu erkennen. Des Weiteren verlief die Kurve flacher und ein Gelanteil von über 50 % ist erst nach 90 Umwälzungen sichtbar. Das oben erwähnte Stagnieren der Gelbildungskurve ist bei 93 Umwälzungen und einem Gelanteil von 52 % erreicht. Die Scherkraftmischpumpe war jedoch zum Vergleich mit den restlichen im Verlauf des Vorhabens untersuchten Pumpen nur bedingt heranzuziehen, da sich Druckaufbau und Durchflussrate erheblich von den Charakteristika der anderen untersuchten Pumpen unterschieden. Wie nachstehend zu sehen, eignete sie sich jedoch um einen Grundcharakter der Ausprägung der Gelbildungskurven zu erschließen, der bei allen im Folgenden untersuchten Pumpen identisch war. Zusätzlich zeigten alle weiteren Pumpen eine deutlich später einsetzende Gelbildung und damit auch ein späteres Erreichen des Maximums, trotz einer deutlich höheren Durchflussrate und damit einhergehender höherer Fließgeschwindigkeit. Dies belegt generell die Relation zwischen den erzeugten Beta-Glucan-Gelen und der eingebrachten Scherkräfte durch die Pumpe. Eine Auflistung der im Verlauf des Vorhabens untersuchten Pumpen mit ihren nominalen Eigenschaften ist in Anhang 7.8 ersichtlich.

- Selbstsaugende Kreiselpumpe

Das auf die Scherkraftmischpumpe folgende Untersuchungsobjekt stellte eine selbstsaugende Kreiselpumpe dar. Wie in Anhang 7.9 zu sehen, folgt auch die Gelbildungskurve dieser Pumpe dem oben beschriebenen Muster. Im Vergleich zur Scherkraftmischpumpe steigt der Gelanteil allerdings erst deutlich später an. Bei voller Drehzahl ( $2900 \text{ min}^{-1}$ ) und damit einem maximalen gemessenem Volumenstrom von  $9,92 \text{ m}^3/\text{h}$  beginnt der Gelanteil des Beta-Glucan-Mediums in der Teststrecke erst nach über 100 Umwälzungen signifikant anzusteigen. Das Maximum ist im Mittel nach 234 Umwälzungen mit einem Gelanteil von 66 % erreicht. Laut oben genannter Berechnung würde dies in einer Scherkraftkennzahl von 0,28 resultieren. Wie bereits bei der Scherkraftmischpumpe, wurde die Drehzahl der Pumpe folgend über den in der Teststrecke integrierten Frequenzumrichter reduziert, was auch in diesem Fall einen späteren Anstieg sowie ein späteres und geringeres Maximum der Gelbildungskurve mit sich brachte. Die Förderung mit einem Dreiviertel der nominalen Drehzahl würde den Scherkraftkoeffizienten dementsprechend auf 0,24 verringern.

Bei darauffolgenden Versuchen musste mit einer neuen Lieferung des Gersten-Beta-Glucans zur Herstellung des Testmediums gearbeitet werden. Es zeigte sich, dass dieses trotz nahezu identischer Werte auf beiliegendem Analysenzertifikat deutlich andere Eigenschaften mit sich brachte. Die

Gerstenzusammensetzung unterliegt naturgemäß erntebedingten Schwankungen, was auch bei gleichen quantitativen Analyseergebnissen unterschiedliche Kettenlängen der  $\beta$ -Glucan-Moleküle mit sich bringen kann.  $\beta$ -Glucane verschiedener Gerstenchargen können demzufolge unterschiedlich auf Scherbeanspruchung reagieren. Die Gelbildungskurven unterschieden also trotz ansonsten gleicher Versuchsbedingungen zwischen den zwei Chargen (im Folgenden und in den Anhängen bezeichnet als #A01 und #A02) erheblich. In Anhang 7.10 sind diese Unterschiede dargestellt. Es muss aufgrund dieser Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, unterschiedliche Analysemethoden zu unterschiedlichen Resultaten die Beta-Glucan-Konzentration betreffend gelangen, beziehungsweise, dass diese unterschiedlich große Polymere unterschiedlich stark erfassen. Dies im Zusammenhang mit Erkenntnissen, zu denen Wagner, et al. [4] bereits 1988 gelangte, nämlich dass nur eine bestimmte Fraktion innerhalb der Beta-Glucane für die Gelbildung verantwortlich ist, würde diesen Umstand erklären. Durch die weitere Verwendung der Charge #A02 konnten Vergleiche mit früheren Versuchen mit der Scherkraftmischpumpe im Folgenden nicht mehr gezogen werden.

- Normalsaugende Kreiselpumpe

Das auf die selbstsaugende Kreiselpumpe folgende Untersuchungsobjekt bildete eine normalsaugende Kreiselpumpe mit nahezu identischen nominalen Werten (siehe Anhang 7.8). Im Vergleich zur davor untersuchten selbstsaugenden Pumpe zeichnete sich eine deutlich schonendere Pumpenarbeit ab. Die Ergebnisse der beiden untersuchten Betriebspunkte bei voller und bei 75 prozentiger Drehzahl sind im Anhang 7.11 dargestellt. Der Scherkraftkoeffizient für die normalsaugende Kreiselpumpe betrug bei voller Leistung ( $2890 \text{ min}^{-1} / 9,79 \text{ m}^3/\text{h}$ ) 0,26. Im Vergleich dazu lieferte die selbstsaugende Kreiselpumpe unter Verwendung der vergleichbaren  $\beta$ -Glucan-Charge #A02 einen deutlich höheren Koeffizienten mit 0,40. Diese Tendenz war auch bei auf ein dreiviertel reduzierter Drehzahl und damit bei niedrigerem Volumenstrom bei beiden Pumpen zu erkennen. Hier lieferte die normalsaugende Kreiselpumpe einen Scherkraftkoeffizienten von 0,15 während sich bei der selbstsaugenden Pumpe ein Scherkraftkoeffizient von 0,35 errechnete. Aufgrund dieses Berechnungsmodells ergibt, dass die selbstsaugende Kreiselpumpe in etwa 1,5- bis 2-mal so viele Scherkräfte in das Medium einbringt wie die normalsaugende Kreiselpumpe. Da sich beide Pumpen weder signifikant in ihrer Auslegung noch in Laufradgröße und Design unterschieden, kann davon ausgegangen werden, dass der hauptsächliche bauliche Unterschied, nämlich ein sogenannter Inducer vor dem eigentlichen Laufrad als zusätzliches rotierendes Element für den erhöhten Scherkrafteintrag verantwortlich gemacht werden kann. Die Bedeutung der rotierenden

Teile in der Pumpe konnte im weiteren Verlauf des Vorhabens bestätigt werden und wird an gegebener Stelle vertieft.

Nach den bisher beschriebenen Versuchen wurde um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Pumpen zu erzielen die bereits in Abschnitt 2.3 erwähnte Drossel vor dem Wiedereintritt in den Vorratsbehälter um 48° geschlossen. Dadurch konnten die anschließenden Versuche nicht mehr uneingeschränkt mit den Versuchen verglichen werden, die in den Arbeitspaketen zuvor durchgeführt wurden. Durch die genaue Ausrichtung der Anlagenkennlinie auf den Punkt 10 m<sup>3</sup>/h und 20 m konnte jedoch eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den nachfolgend untersuchten Pumpen erzielt werden. Die Auslegung auf den besagten Volumenstrom und Druck wurde mit Wasser als Versuchsmedium durchgeführt, da sich die Viskosität des  $\beta$ -Glucan-Mediums im Laufe eines Versuchs stark verändert, und auch die Pumpenkennlinien mit Wasser als Versuchsmedium vom Hersteller erstellt werden. Da die generelle Viskosität eines  $\beta$ -Glucan-Mediums deutlich höher ist als die von Wasser, sind die gemessenen Volumenströme in den folgenden Versuchen geringer als in den nominalen Angaben. Durch die Veränderung der Versuchsparameter durch die Drosselklappe konnten interessanterweise Forschungsergebnisse von Denk [5] bestätigt werden, in denen auch er die Verwendung eines Frequenzumrichters zur Beeinflussung des Volumenstroms im Vergleich zu einer Drosselklappe mit dem Eintrag von deutlich weniger Scherkräften durch eine Kreiselpumpe aufgezeigt hat. Die vergleichenden Gelbildungskurven derselben Pumpe bei gleichen Versuchsparametern, zum einen gedrosselt, zum anderen frequenzgeregelt sind in Anhang 7.12 dargestellt.

- Drehkolbenpumpen

Nach den ersten Versuchen mit angepasster Anlagenkennlinie durch die oben beschriebene Teilschließung der Drosselklappe musste eine erneut das  $\beta$ -Glucan-Produkt (hier genannt #B01) gewechselt werden. Wie bereits zuvor beschrieben, brachte dies eine erneute Änderung des Gelbildungsverhaltens bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen mit sich. Aufgrund dieser durch das Gersten- $\beta$ -Glucan verursachten häufig wechselnden Versuchsbedingungen musste sich in gewissem Umfang auf untereinander vergleichende Versuche beschränkt werden. So folgte zunächst die Betrachtung zweier Drehkolbenpumpen, welche als Repräsentanten der Verdrängerpumpen ein anderes Förderprinzip verfolgen und somit ohnehin nur bedingt mit den zuvor untersuchten Zentrifugalpumpen verglichen werden können. Die Gelbildungskurven der beiden Drehkolbenpumpen sind in Anhang 7.13 dargestellt. Der Scherkraftkoeffizient für Drehkolbenpumpe A lag, die erheblichen Standardabweichungen berücksichtigend, zwischen 0,29 und 0,19 während der

Scherkraftkoeffizient der Drehkolbenpumpe B bei 0,41 lag. Dieser deutlich unterschiedliche Verlauf der beiden Gelbildungskurven trotz gleicher Anwendungsauslegung der Pumpen ist wahrscheinlich auf zwei bauliche Unterschiede unter den Pumpen zurückzuführen. Zum einen waren die Drehkolben beider Pumpen leicht unterschiedlich gestaltet, wobei Drehkolbenpumpe A mit vierflügligen Kolben, und Drehkolbenpumpe B mit dreiflügligen Kolben ausgestattet war. Zum anderen waren, wie auch in Anhang 7.8 erkenntlich, beide Pumpen unterschiedlich dimensioniert, was bedeutet, dass Drehkolbenpumpe A über deutlich größere Saug- und Druckstutzen (DN65 vs. DN40) und über größere Drehkolben verfügte. Dies führte zu dem Effekt, dass die Kolben dieser Pumpe deutlich langsamer ( $457 \text{ min}^{-1}$  vs.  $705 \text{ min}^{-1}$ ) rotieren mussten, um den gleichen Durchfluss und den gleichen Druckaufbau zu erzeugen, was jedoch mit einer vergleichsweise höheren Energieverbrauch verbunden war. Es kann an dieser Stelle nicht eindeutig postuliert werden, welcher der baulichen Unterschiede wie stark für die schonendere Förderung der größeren Pumpe verantwortlich ist. In Anbetracht der Gesamtheit der Ergebnisse, die im Verlaufe dieses Vorhabens generiert wurden, kann jedoch ausgesagt werden, dass die langsamere Drehzahl den Hauptunterschied in der Schonförderung, beziehungsweise Scherkraftvermeidung ausmacht.

- Exzentrerschneckenpumpe

Um einen weiteren Typ in der Gruppe der Verdrängerpumpen in den Schonfördervergleich mit einzubeziehen, wurde als nächstes Untersuchungsobjekt eine Exzentrerschneckenpumpe in die Teststrecke integriert. Da diese Pumpe auf einen größeren Anwendungsfall ausgelegt war (siehe Anhang 7.8) musste sie – aus Gründen der Vergleichbarkeit - von vornherein über den in die Teststrecke integrierten Frequenzumrichter mit reduzierter Drehzahl betrieben werden. Um einen Durchfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  und einen Druck von 2 bar zu erzeugen, wurde die Drehzahl der Exzentrerschnecke auf  $220 \text{ min}^{-1}$  heruntergeregelt. Es zeigte sich noch während des ersten Versuchs, dass die Gelbildung durch die Förderung mit der Exzentrerschneckenpumpe im Vergleich zu allen vorher untersuchten Pumpen sehr langsam von statten ging. So musste der Versuch über einen Zeitraum von 28 Stunden durchgeführt werden. Aus dieser notwendigen erhöhten Versuchslaufzeit, ergab sich eine neue Problematik den Zeitpunkt der Probenanalyse betreffend, welche wie eingangs beschrieben bisher am Folgetag zum Scherversuch stattfand. Muss ein Versuch über einen Zeitraum von 24 Stunden gefahren werden, so würde eine zu Beginn des Versuchs gezogene Probe ca. 25 Stunden lagern, während die letzte Probe nur eine Stunde lagern würde. In Anhang 7.14, Abbildung 28 sind verschiedene Gelbildungskurven aus angesprochenem Versuch nach unterschiedlich langer Lagerung dargestellt. Es ist zu sehen, dass die prozentuale Gelbildung über die Lagerzeit noch erheblich ansteigt. Da sehr viele Messpunkte fehlen, kann ein Scherkraftkoeffizient hier nur grob



zwischen 0,05 und 0,09 abgeschätzt werden. Dieser Schätzwert kann aber dennoch als Vergleich zu den Werten der beiden Drehkolbenpumpen herangezogen werden, da diese trotz aller Ungenauigkeiten signifikant höher sind. Da die Ausbildung der Gele wie erläutert auch erheblich durch die Lagerzeit nach der Scherung beeinflusst wird, ergab sich an dieser Stelle die Notwendigkeit einer längeren Probenlagerzeit, um diesen verfälschenden Faktor ausschließen zu können. Zunächst konnte wie in Anhang 7.15 zu sehen, in Laborversuchen gezeigt werden, dass die Lagertemperatur im Rahmen von 4 °C und 21 °C nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gelbildung hat. Zusätzlich wurde in diesem Zusammenhang untersucht, inwiefern sich  $\beta$ -Glucan-Gele, die durch Erwärmung aufgelöst wurden bei weiterer Lagerung wieder zurückbilden. Sowohl bei 21 °C als auch bei 4 °C Lagertemperatur fand keine Rückbildung der Gele statt, wonach sich die Frage stellt, inwieweit Scherkräfte im Sudhaus der Brauerei, also im Heißbereich überhaupt eine Rolle spielen. Die gängige Lehrmeinung zu dieser Thematik beschreibt zum jetzigen Zeitpunkt das Gegenteil, woraus sich eine genauere Untersuchung in einem sich eventuell anschließendem Entwicklungsprojekt generieren sollte. Außerdem hat sich gezeigt, dass nach 6 - 8 Tagen Lagerung alles Beta-Glucan, welches durch die zuvor erfahrene Scherung strukturell so ausgerichtet ist, dass es zur Gelbildung befähigt, Gele vollständig ausbildet.

Da nach mehr als 8 Tagen Lagerung auch bei kälteren Temperaturen der mikrobiologische Zerfall der Probe einsetzt, wurden für alle folgenden Versuche 8 Tage Probenlagerung bei 4°C zwischen dem Start des Scherversuchs und dem Analysezeitpunkt festgelegt. Der Versuch mit der Exzentrerschneckenpumpe wurde unter diesen neuen Voraussetzungen wiederholt, wobei gleichzeitig eine neue Liefercharge des Gersten-Beta-Glucan-Produkts (hier genannt #B02) eingesetzt werden musste. Die Ergebnisse sind in Anhang 7.14, Abbildung 29 dargestellt. Nach diesem Versuch mit der neuen Beta-Glucan-Charge und der deutlich längeren Lagerzeit zwischen Probenahme und Probenanalyse ergab sich ein Scherkraftkoeffizient von 0,095 welcher aufgrund der veränderten Versuchsparameter allerdings nur mit nachfolgenden Versuchen zum Vergleich herangezogen werden kann.

- Kreiselpumpen

Kreisel- oder Zentrifugalpumpen bilden in der Brauerei- und Getränkeindustrie den größten Anteil an Fördermaschinen für flüssige Medien. Aufgrund dessen wurden drei für den gleichen Anwendungsfall ausgelegte Kreiselpumpen von drei unterschiedlichen Herstellern nach der letztendlich festgelegten Versuchsanweisung hinsichtlich des Scherkrafteintrags untersucht. Die drei Pumpen unterschieden sich, wie in Anhang 7.8 zu sehen, in ihren nominalen Werten nur unbedeutend voneinander.

Minimale Unterschiede bestanden darin, dass Kreiselpumpe B über ein im Durchmesser 20, beziehungsweise 24 cm größeres Laufrad verfügte, und dass bei Kreiselpumpe A der Saugstutzen in DN50 und nicht wie bei den beiden anderen Kreiselpumpen in DN40 gefertigt war. Abgesehen von diesen nominalen Angaben unterscheiden sich die Pumpen jedoch in ihrem Design, vor allem was den Durchmesser aber auch die Tiefe des Ringraums betrifft. Auch die Laufradgeometrie wies bei jedem Hersteller leichte Unterschiede auf, obwohl sie alle in offener Bauweise gefertigt waren. Genau solche baulichen Unterschiede werden von Pumpenherstellern häufig als Mittel zur Generierung schonfördernder Eigenschaften hervorgehoben. Es konnten in den direkt aufeinanderfolgenden Untersuchungen dieser drei Pumpen jedoch nur tendenzielle Unterschiede hinsichtlich der Gelbildungsrates ermittelt werden. Die Ergebnisse in Anhang 7.16 ersichtlich. Dies lässt den Schluss zu, dass neben allen anderen theoretisch den Scherkrafteintrag beeinflussenden Faktoren wie Fließgeschwindigkeit in den Rohrleitungen oder Größe des Ringspalts im Pumpenkopf, die Drehzahl des rotierenden Elements, hier des Laufrades, als hauptverantwortlicher den Scherkrafteintrag beeinflussender Faktor angesehen werden kann. Immer vorausgesetzt, dass die Pumpenauslegung die gleiche ist. Wird beispielsweise ein kleineres Laufrad in eine bestehende Pumpe eingebaut, wobei die Drehzahl unverändert bleibt, so ändert sich die Pumpenkennlinie und damit die Auslegung der Pumpe. Die Ergebnisse zu diesem Versuch sind in Anhang 7.17 dargestellt. Die Pumpe war durch diese bauliche Veränderung zu klein für die Anlage dimensioniert, und bildete damit trotz deutlich geringerem Volumenstrom und damit geringerer Fließgeschwindigkeit mehr Gele in nach weniger Umwälzungen. Neben der Drehzahl aller rotierenden Elemente als Haupteinflussfaktor auf die Scherkraftbelastung kann also vor allem bei Zentrifugalpumpen der Anlagenwiderstand gesehen werden. Die Untersuchungen haben in ihrer Gesamtheit gezeigt, dass eine zu groß ausgelegte Pumpe (siehe Untersuchungen vor der Teilschließung der Drosselklappe, vgl. Anhang 7.12) einen positiven Einfluss auf die Schonförderung hat, während eine zu klein ausgelegte Pumpe einen negativen Einfluss hat. Dies zeigte sich auch bei einer weiteren Versuchsreihe, bei der die Anlagenkennlinie durch den Einbau von Schläuchen nochmals verändert wurde. Dazu wurde zunächst die druckseitige Schlauchverbindung von der Pumpe zur Anlage durch einen 15 Meter langen Schlauch mit 20 mm Innendurchmesser ersetzt. In einem zweiten Versuch wurde dieser durch einen Schlauch der gleichen Länge und einem Innendurchmesser von 32 mm ersetzt. Die Drosselklappe wurde bei diesen Versuchen komplett geöffnet. In Anhang 7.6 sind die verschiedenen daraus resultierenden Anlagenkennlinien dargestellt. Da der Rohrleitungswiderstand bei dem Versuch mit dem dünneren eingebauten Schlauch mit Abstand am höchsten war, wurden auch der geringste Druckanstieg in der Rohrleitung und der geringste Volumenstrom verzeichnet. Durch den geringen Schlauchdurchmesser betrug die Fließgeschwindigkeit an dieser Stelle maximal 3,47 m/s. Der breitere Schlauch verursachte in etwa den gleichen Widerstand wie die um 48° geschlossene

Drosselklappe bei den vorherigen Versuchen, was verglichen mit dem dünneren Schlauch einen mehr als doppelt so hohen Volumenstrom generierte. Aufgrund des größeren Durchmessers konnte hier eine maximale Fließgeschwindigkeit von 2,82 m/s ermittelt werden. Vergleicht man nun die Gelbildungskurven dieser Versuche wie sie in Anhang 7.18 dargestellt sind, ist erkenntlich, dass der Versuch mit dem dünneren Schlauch, welcher den höchsten Widerstand erzeugte auch den höchsten Scherkrafteintrag verursachte. Der Versuch mit dem breiteren Schlauch hingegen verursachte eine ähnliche Gelbildungskurve wie bei den vorherigen Versuchen mit der halb geschlossenen Drosselklappe, welche wiederum auch einen nahezu identischen Widerstand erzeugte. Dies ist ein weiterer Indikator dafür, dass sich ein zu hoher Anlagenwiderstand negativ auf den Scherkrafteintrag ausübt.

Um eine wie im Forschungsantrag formulierte Scherbelastungskennlinie zu entwickeln, wurde die Kreiselpumpe A bei vier verschiedenen Betriebspunkten hinsichtlich des Scherkrafteintrags getestet. Die verschiedenen Betriebspunkte wurden dabei über den integrierten Frequenzumrichter eingestellt. Die Gelbildungskurven dieser Versuche sind im Anhang 7.19, Abbildung 36 dargestellt. Wenn die Berechnung der Scherkraftkoeffizienten wie im Verlaufe des Berichts beschrieben vorgenommen wird, ergibt sich aus den Werten wie in Anhang 7.19, Abbildung 37 dargestellt eine lineare Kurve mit Schnittpunkt im Koordinatenursprung. Je langsamer sich das Laufrad drehte, umso schonender gestaltete sich die Pumpenarbeit. Da sich Beta-Glucan-Gel thixotrop verhält [6], müssen die Volumenströme im Diagramm als nominale Werte angenommen werden. Der gemessene Volumenstrom ist aufgrund der generell höheren Viskosität der Versuchslösung niedriger, als es sich mit Wasser als Medium gestalten würde. Er verändert sich aber auch durch das thixotrope Verhalten der Beta-Glucan-Gele während des Versuchs. Es zeigte sich vor allem bei höheren Drehzahlen, dass die Gelbildung im Medium zusammen mit dem gemessenen Volumenstrom ansteigt, was daran liegt, dass sich ein Beta-Glucan-Fluid generell newtonsch verhält, Beta-Glucan-Gele jedoch nichtnewtonsch. Somit sinkt bei dem Übergang vom Sol- in den Gelzustand die Viskosität immer weiter ab und erhöht sich erst nach Ende der Scherung wieder. Beispiele für dieses Verhalten sind in Anhang 7.20 gegeben.

## Literatur:

- [1] Van Bergen, B., „The Effect of Mechanical Shear on Brewing Yeast“, Master Thesis, McGill University, Montreal, 2001
- [2] Lange, H., Taillandier, P., Riba, J.-P., „Effect of high shear stress on microbial viability“, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 76, 2001
- [3] Kupetz, M., „Predicting filterability using an accurate  $\beta$ -glucan assay“, 35. EBC Kongress, 2015
- [4] Wagner, N., Esser, K.D., und Krüger, E., „Analytik und die Bedeutung hochmolekularer  $\beta$ -Glucane in Bier“, Monatschrift für Brauwissenschaft, 41(1988), Heft 10, pp. 384-395
- [5] Denk, V.: „Die Wirkung von Schubspannungen auf die Würzeinhaltsstoffe“, EBC, Proceedings 25. Kongress, 1995
- [6] Wagner, N., Krüger, E., „Rheologische Eigenschaften der  $\beta$ -Glucane in Bier, Teil 2: Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bier,  $\beta$ -Glucan und  $\beta$ -Glucan-Gel“, Monatschrift für Brauwissenschaft 12 (1990), pp. 401 – 406

### **3 Bewertung der erzielten Ergebnisse**

#### **3.1 Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages**

Im Folgenden werden die im Antrag ausgegebenen Einzelziele den tatsächlich erzielten Ergebnissen gegenübergestellt.

##### **3.1.1 Entwicklung und Optimierung eines geeigneten Beta-Glucan-Testmediums und eines geeigneten Hefe-Testmediums**

Wie in Abschnitt 2.1 ausführlich beschrieben, wurde ein Beta-Glucan-Testmedium entwickelt, welches durch seine Gelbildung reproduzierbar in der Lage ist, die eingetragenen Scherkräfte darzustellen. Durch das nach eigens entwickeltem Verfahren hergestellte Testfluid konnten, wie in Abschnitt 2.4 erörtert, diverse Pumpentypen hinsichtlich ihrer Schonfördereigenschaften evaluiert werden. Einschränkungen des Beta-Glucan-Testmediums betreffend gab es hinsichtlich der Verfügbarkeit des Gersten-Beta-Glucan-Rohproduktes und des naturgemäß abweichenden Gelbildungspotenzials im Vergleich verschiedener Lieferchargen. So musste die Konzentration des Beta-Glucans im Testmedium bei jeder neuen Charge leicht angepasst werden. Außerdem war es durch die unterschiedlichen Gelbildungspotenziale nur möglich Pumpenvergleiche innerhalb einer Beta-Glucan-Charge zu ziehen.

Das Hefe-Testmedium wurde, wie ebenfalls ausführlich in Abschnitt 2.1 beschrieben, in Laborversuchen eingehend auf seine Scherkraftsensibilität untersucht. Dabei zeigte sich nicht der gewünschte Effekt der steigenden Todzellenzahl mit steigender Scherbelastung. Da die Hefezellen nach den hier durchgeführten Untersuchungen vergleichsweise unsensibel gegenüber dieser Art von mechanischem Stress sind und deren Viabilität von noch mehr Faktoren beeinflusst wird als die Gelbildung der Beta-Glucane, wurde auf eine weitere Verwendung eines Hefetestmediums zur Pumpenevaluierung verzichtet. Daraus generierten sich gewisse Abweichungen zu den im Antrag formulierten Arbeitspaketen, wobei ein möglicher Ausschluss eines der zwei geplanten Testmedien auch dort bereits erwähnt wurde.

Zusätzlich zu den im Forschungsantrag formulierten Zielen wurde ein Kieseloltestmedium hinsichtlich seiner Scherkraftsensibilität untersucht. Es zeigten sich aber auch bei diesem Medium keine scherkraftinduzierten Veränderungen in den Fluideigenschaften. Die vermutete Verschiebung der Partikelgrößenverteilung blieb auch bei intensiver Scherung aus.

### **3.1.2 Evaluierung der kolorimetrischen Schnelltestmethode zur Bestimmung der Gelbildung im $\beta$ -Glucan-Testmedium im Vergleich zur fluorimetrischen Referenzmethode**

Die unternommenen Arbeitsschritte sind in Abschnitt 2.2 detailliert erläutert. Es wurden signifikante Unterschiede zwischen den Analyseergebnissen der kolorimetrischen Schnelltestmethode und der aufwändigeren und weitaus kostenintensiveren fluorimetrischen Methode festgestellt. Diese Unterschiede konnten jedoch zum einen anhand eigener über den Verlauf des Vorhabens generierter Erkenntnisse und zum anderen anhand neuer Ergebnisse anderer Forschungseinrichtungen begründet werden. Die Resultate kolorimetrischer Untersuchungen können also nicht ohne weiteres mit denen anderer Analysemethoden verglichen werden. Innerhalb der Methode zeigte sich der Schnelltest jedoch als geeignet um die Gelbildung der  $\beta$ -Glucane in den Scherversuchen zu bestimmen. Anhand der Masse der nötigen Probenuntersuchungen wäre eine teurere und aufwändigere Methode wie beispielsweise die fluorimetrische nicht realisierbar.

### **3.1.3 Inbetriebnahme der eigens konstruierten Testsrecke zur standardisierten Untersuchung von Pumpen und Strömungsparametern im jeweiligen Testmedium**

Die Pumpenteststrecke wurde wie in Abschnitt 2.3 ausführlich beschrieben planmäßig in Betrieb genommen. Es wurde sich dabei umfassend mit der Generierung der Anlagenkennlinie und deren Beeinflussung befasst, was sich für den Verlauf des Vorhabens als unverzichtbare Bezugsgröße für die Bewertung der untersuchten Pumpen erwiesen hat. In Bezug auf die Standardisierung der Versuche mussten jedoch Einschränkungen akzeptiert werden, vor allem was die Temperaturkontrolle betrifft.

### **3.1.4 Entwicklung einer Scherbelastungskennlinie zusätzlich zu den leistungsbezogenen existierenden Pumpenkennlinien**

In Abschnitt 2.4 wurden die einzelnen zur Zielerreichung notwendigen Arbeitsschritte detailliert beschrieben. Es konnte eine Standardversuchsanweisung zur Generierung einer Scherbelastungskennlinie entwickelt werden, die anhand einer Pumpe beispielhaft erstellt wurde. Das Hauptziel des Vorhabens wurde damit erreicht. Ferner konnten viele allgemeine Zusammenhänge sowohl die Beta-Glucan-Gelbildung, als auch Einflussfaktoren auf die

Scherbelastung genauestens beleuchtet werden. Damit konnten sowohl bestehendes Wissen bestätigt, als auch neue, zum Teil kontroverse Sachverhalte beleuchtet werden.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass noch nicht alle neben den eingetragenen Scherkräften die Gelbildung beeinflussenden Versuchsparameter in dem Maße standardisiert werden konnten, als dass die entwickelte Methode ihre Marktreife als Dienstleistung erreicht hätte. Dies birgt allerdings großes Potenzial für zukünftige Forschungsvorhaben.

Aufgrund einiger unerwarteter Erkenntnisse musste der Arbeitsplan im Vergleich zu den Arbeitspaketen im Antrag zum Teil stark variiert werden. Dies betraf vor allem die im Antrag formulierte Anzahl der Testläufe der einzelnen Pumpen. Um gewissen Schwankungen der Versuchsergebnisse Rechnung zu tragen, wurden nahezu alle Versuche in Zwei- und zum Teil in Dreifachbestimmung durchgeführt, sodass mit Mittelwerten und Standardabweichungen gearbeitet werden konnte. Außerdem wurde die Dauer eines Versuchs zum Zeitpunkt der Antragstellung zu kurz eingeschätzt. Es konnte nicht abgesehen werden, dass ein Versuch inklusive Vor- und Nachbereitung je nach untersuchter Pumpe drei bis vier komplette Arbeitstage in Anspruch nehmen würde. Die Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit auf die Gelbildung und damit die Schonförderung musste auch auf andere Art und Weise als im Antrag formuliert geschehen, da festgestellt wurde, dass Anlagenwiderstand und Drehzahl die beiden Haupteinflussparameter auf die Schonförderung darstellen. Die Einstellung verschiedener Fließgeschwindigkeiten über die Pumpendrehzahl würde die größte Veränderung in der Gelbildung also schon allein durch die Drehzahlveränderung an sich hervorgerufen. Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit konnte aber allgemein über die Gesamtheit der Versuche und insbesondere über eine Variierung des Teststreckenaufbaus beurteilt werden. Grundsätzlich und zusammenfassend ist zu sagen, dass sämtliche Veränderungen die Arbeitsabläufe betreffend im Sinne der Erreichung des Gesamtzieles durchgeführt wurden.

### **3.2 Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

An dem abgeschlossenen Projekt wirkten mit dem Projektleiter und dem hauptsächlich durchführenden Ingenieur zwei Mitarbeiter der Gruppe A mit. Weiterhin war eine Laborfachkraft am Projekt beteiligt.

Der Projektleiter war neben seiner betreuenden und beratenden Funktion im Verlauf des gesamten Projektes besonders wichtig durch seine guten Kontakte in die Brau-, Getränke- und Zulieferindustrie sowie zu wissenschaftlichen Kreisen im In- und Ausland. Dies ermöglichte beispielsweise die

kostenlose Beschaffung der auf Spendenbasis zur Verfügung gestellten Kreisel- und Drehkolbenpumpen, die für das Projekt essentiell waren. Weiterhin bot er stets Gelegenheit, das laufende Vorhaben bereits während der Durchführung in den entsprechenden Kreisen bekannt zu machen. Er organisierte Veröffentlichungsgelegenheiten und lieferte wertvolle Mitarbeit und Unterstützung bei der Erarbeitung von Vorträgen, Berichten und Präsentationen. Ohne seinen Arbeitsbeitrag im erfolgten Umfang wäre die Durchführung des Vorhabens so nicht möglich gewesen.

Der durchführende Ingenieur war mit der Gesamtkoordination aller Aspekte rund um die einzelnen Arbeitspakete betraut. So oblag ihm die Planung und Abwicklung der durchgeführten Versuche sowie die Beschaffung vorhabenbezogener Geräte, Materialien oder Dienstleistungen. Die wichtigsten Tätigkeiten bestanden in der Entwicklung der Herstellungsmethodik des  $\beta$ -Glucan-Testmediums sowie der generellen Methodenentwicklung für die Durchführung der Scherversuche. Darüber hinaus war er unter anderem für die projektbegleitenden Berichte verantwortlich, erstellte vorhabenbezogene Präsentationen und hielt Vorträge.

Am arbeitsintensivsten war generell die Durchführung der Scherversuche mit der Vielzahl an untersuchten Pumpen, beziehungsweise Pumpentypen. Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 erwähnt, nahm diese deutlich mehr Zeit in Anspruch als geplant, weswegen im Sinne der ausgegebenen Ziele die Versuchsplanung variiert werden musste. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die geleistete Arbeit in Umfang und Form notwendig für einen erfolgreichen Abschluss des Projekts war.

### **3.3 Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Personalausgaben als größte Position des zahlenmäßigen Nachweises ergeben sich aus den oben aufgeführten Tätigkeiten und waren gemäß der Zielsetzung des Antrages erforderlich.

Als Einzelgeräte, die projektbezogen angeschafft wurden, sind die Pumpenteststrecke, die Scherkraftmischpumpe, sowie die Exzentrerschneckenpumpe zu nennen. Die Pumpenteststrecke als Kernstück des Vorhabens sowie die Scherkraftmischpumpe als am stärksten und die Exzentrerschneckenpumpe als die am schwächsten scherende Pumpe waren in ihrer Anschaffung für das Erreichen des Projektziels unvermeidlich. Gleiches gilt für die immer wiederkehrende Besorgung des Gersten- $\beta$ -Glucans und des Analyse-Testkits, ohne die eine Durchführung des Projektes nicht möglich gewesen wäre.



## **4 Darstellung der Innovationspotenziale und Applikationsmöglichkeiten**

### **4.1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung, Anwendungspotenzial, Anwendungsbereiche in der mittelständigen Wirtschaft**

Die wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse sind prinzipiell dieselben, die schon bei der Antragstellung zusammengetragen wurden. Durch die entwickelte Methodik kann die viel beschriebene Schonförderung durch Pumpen objektiv beziffert werden. Dies hilft vor allem dem Anwender in der Brauerei- und Getränkeindustrie bei Investitionsentscheidungen. Sekundär können durch die Wahl der tatsächlich schonenderen Pumpe in der Brauerei erhebliche Filtrationsverluste durch das Nichtausbilden der gefürchteten  $\beta$ -Glucan-Gele vermieden werden. Zur Folge hätte dies immense Einsparungen in Filterhilfsmitteln, sowie in Personal- und Reinigungskosten. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Getränkeindustrie in Deutschland, im speziellen Brauereien und Mineralbrunnen, im Wesentlichen mittelständisch geprägt ist. Auch den Pumpenherstellerfirmen von denen ein Teil den mittelständischen Unternehmen zugeordnet werden kann, würde die Anwendung der neuen Methodik in der Entwicklung von Strategien zur Scherkraftvermeidung ein nützliches Werkzeug sein. Ein großes Interesse an den Forschungsergebnissen wurde nicht zuletzt durch die große Bereitschaft der Pumpenhersteller deutlich, Pumpen im Wert von mehreren Tausend Euro für das Projekt zu spenden.

Die wissenschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens lag zum einen in den neuen Erkenntnissen, welche Einflüsse verschiedene pumpen- und anlagenseitige Modifikationen auf den Scherkrafteintrag haben. Zum anderen, was zunächst nahezu als Nebenbeobachtung deklariert wurde, welche Parameter neben Scherkräften wie stark für die Beta-Glucan-Gelbildung verantwortlich sind. Gerade letzteres steht zum Teil kontrovers gegenüber gängigen Annahmen aus der Praxis. Hervorzuheben sind hier der Einflussfaktor Zeit und Temperatur zwischen der Probenahme und Probenanalyse, das sich nicht wieder ausbilden der Gelstrukturen nach Erhitzung, und die Relevanz der verschiedenen Molekulargewichte innerhalb der  $\beta$ -Glucan-Fraktion.

### **4.2 Darlegung der Ergebnisverwertung (eigene Nutzung, Technologietransfer, Know-how-Verkäufe u.a.)**

Schon zum jetzigen Zeitpunkt wurde eine Vielzahl an Artikeln und Vorträgen zum Vorhaben veröffentlicht. Dabei wurden die zahlreichen Kanäle der VLB Berlin im In- und Ausland genutzt, um entsprechende Informationen, bzw. Ergebnisse zu transferieren. An dieser Stelle ist das große Interesse hervorzuheben, welches die Veröffentlichungen hervorriefen. Die Vorhabenergebnisse

werden auch in Zukunft durch die der VLB gegebenen Möglichkeiten des Technologietransfers publiziert. Beispielhaft sind hier Seminare, Fachartikel, Beratungstätigkeiten und universitäre Lehrstühle zu nennen. Eine zusätzliche Applikationsmöglichkeit seitens der VLB Berlin kann nach Erreichung der Marktreife das Anbieten einer Dienstleistung sein, in der entweder der Pumpenhersteller oder der Pumpenanwender selber sein Aggregat durch die VLB Berlin hinsichtlich der Schonfördereigenschaften evaluieren lassen kann.

### **4.3 Perspektiven und Chancen für sich anschließende Entwicklungsarbeiten**

Eine anschließende Entwicklungsarbeit liegt prinzipiell auf der Hand, nämlich die Weiterentwicklung der Scherkraftquantifizierungsmethodik bis hin zur Marktreife. Hauptsächlich beinhaltet dies die weitere Standardisierung aller Einflussfaktoren auf die  $\beta$ -Glucan-Gelbildung neben den eigentlichen durch die Pumpenarbeit verursachten Scherkräften. Der Einflussfaktor Temperatur, welcher sowohl durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen als auch durch unterschiedlich starke Erwärmung durch Reibung beeinflusst wird, muss dabei genauestens kontrolliert werden können. Ein zusätzlicher Schritt bei der Temperaturkontrolle könnte der Einfluss von verschiedenen Schertemperaturen auf die Gelbildung sein, da hier weitläufig Meinungen existieren, die eigenen während des Vorhabens gemachten Beobachtungen widersprechen. Hinzu kommt der Einflussfaktor der verschiedenen Beta-Glucane mit unterschiedlichem Gelbildungspotenzial, der durch eine Art Blindwertversuch kontrolliert werden muss, um die Abhängigkeit von Lieferchargen und Lieferanten auszuschließen.

Aus letzterem Punkt ergibt sich auch der mögliche Ansatz einer weiteren anschließenden Entwicklungsarbeit. Es wäre vorstellbar, einen Laborscherstand zu entwickeln, der ähnliche oder sogar exaktere Möglichkeiten bietet, die Umgebungseinflüsse auf die Gelbildung zu standardisieren, um damit das Gelbildungsvermögen von Laborwürzen aus verschiedenen Malzproben zu untersuchen. Dies in Zusammenhang mit der gemessenen  $\beta$ -Glucan-Konzentration durch verschiedene Analysemethoden und der ermittelten Molekülgrößenverteilung der  $\beta$ -Glucane in den einzelnen Proben könnte neue Aussagen über die Sinnhaftigkeit von geltenden Grenzwerten in der  $\beta$ -Glucan-Konzentration bei Malzen liefern. Hinzu käme, dass sich durch Ergebnisse aus einer solchen Forschungsarbeit neue Ziele für die Gerstenzüchtung und die Mälzereitechnologie ergeben könnten.

## **5 Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse**

Es wurden keine Patente oder Schutzrechte angemeldet.

## 6 Zusammenstellung aller erfolgten, bzw. geplanten Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen sind bereits erfolgt:

- Vortrag: Fischer, J., „Neue Methoden zur Quantifizierung des Scherkrafteintrags durch Pumpen“, 9. VLB-Seminar für die Brau- und Getränkeindustrie in Russland, Moskau, 2013
- Vortrag: Pahl, R., „Ansätze zur Quantifizierung des Scherkrafteintrags in brauereirelevante Medien“, 101. Brau- und Maschinentechnische Arbeitstagung, Donaueschingen, 2014
- Vortrag: Pahl, R., „Approaches to quantify shear stress in brewery relevant media“, 5th Iberoamerican VLB Symposium, Madrid, 2014
- Vortrag: Fischer, J., „Quantification of the ingress of shear forces by pumping operations – Project presentation and results“, 11th VLB Seminar for the Malting and Brewing Industry in Russia, Moskau, 2015
- Vortrag: Pahl, R., „Investigations of shear forces and biofilms in the brewery“, 6th Ibero-American VLB Symposium, Itupeva, 2015
- Vortrag: Zeuschner, P., „Neue Erkenntnisse zur schonenden Förderung von Würze und Bier“, 22. Dresdner Brauertag, Dresden, 2016
- Artikel: Zeuschner, P., Holewa, M., Fischer, J., Pahl, R., „Quantification and evaluation of the impact of shear forces in brewery relevant media“, Brauereiforum International, 2/2014
- Artikel: Zeuschner, P., Holewa, M., Fischer, J., Pahl, R., „Quantification Of Shear Forces“, Brewing and Beverage Industry International, Nr. 2/2015
  - Übersetzung ins Deutsche: Brauindustrie, Oktober 2015
  - Übersetzung ins Chinesische: Brewing and Beverage Industry China, Nr. 3/2015

## 7 Anhang

### 7.1 $\beta$ -Glucan-Testmedium, Laborversuche

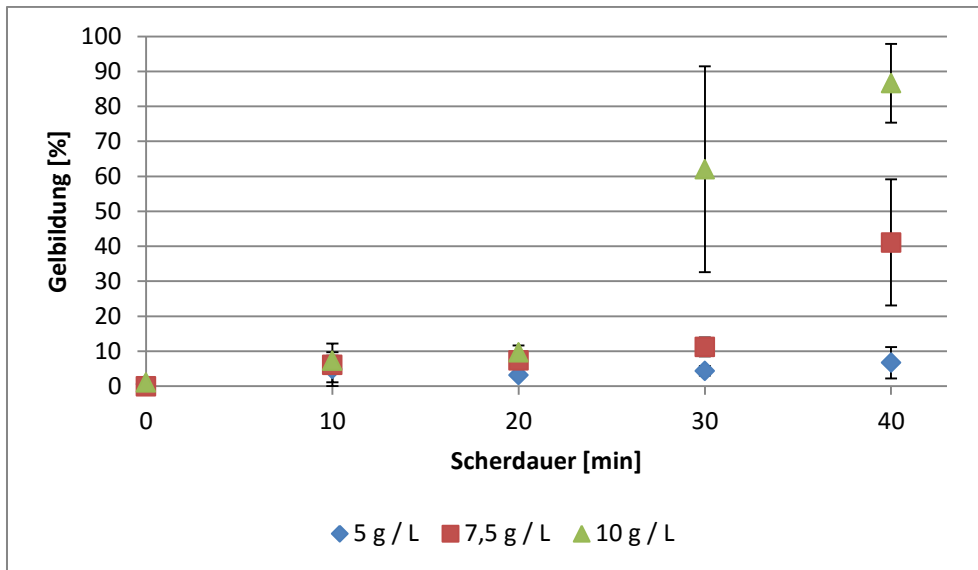


Abbildung 1: Abhängigkeit der  $\beta$ -Glucan-Gelbildung von der  $\beta$ -Glucan-Konzentration bei gleicher Scherstärke, n = 3

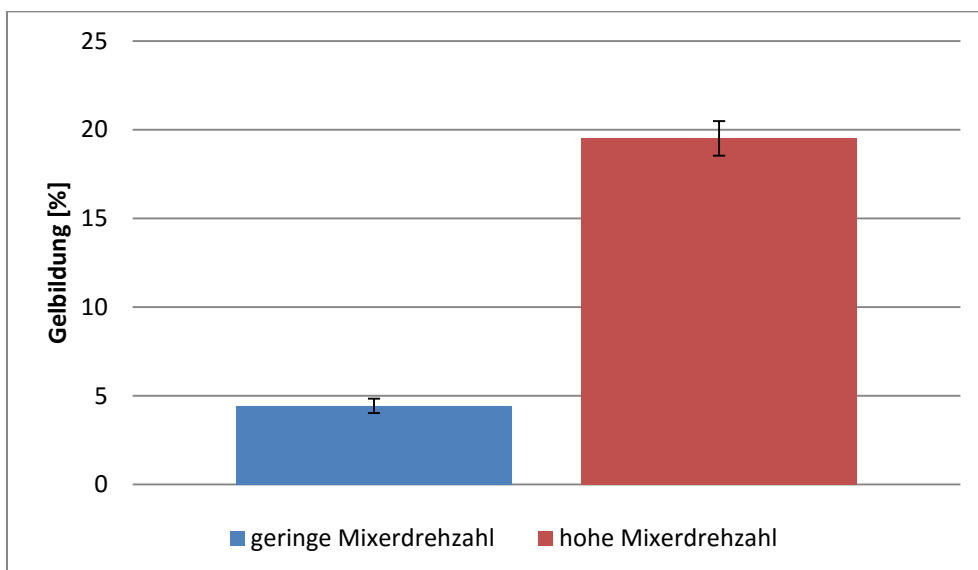


Abbildung 2: Abhängigkeit der  $\beta$ -Glucan-Gelbildung von der Scherstärke bei gleicher Konzentration und Scherdauer, n = 3

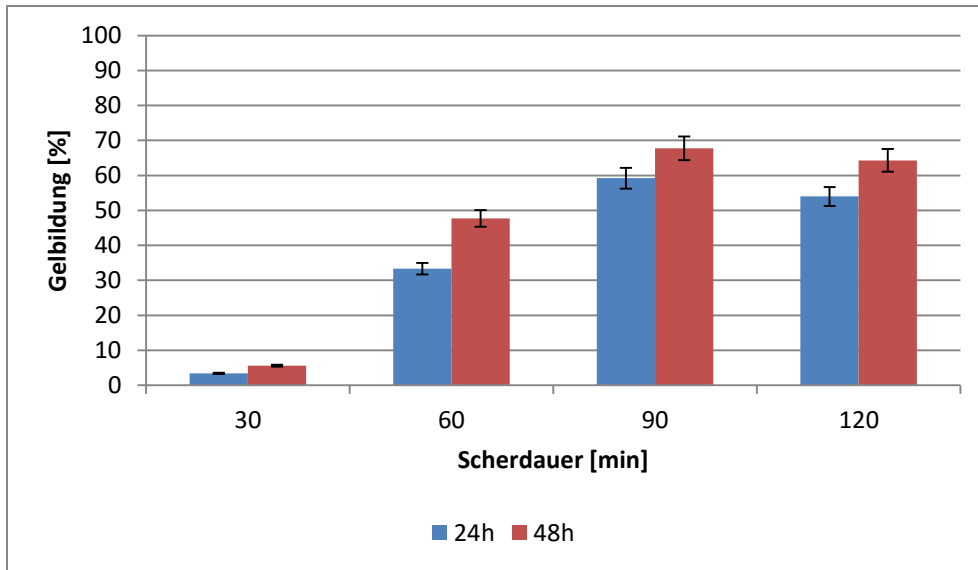


Abbildung 3: Abhängigkeit der  $\beta$ -Glucan-Gelbildung von der Lagerdauer bei gleicher Konzentration und Scherstärke, n = 3

## 7.2 Hefe-Testmedium, Laborversuche

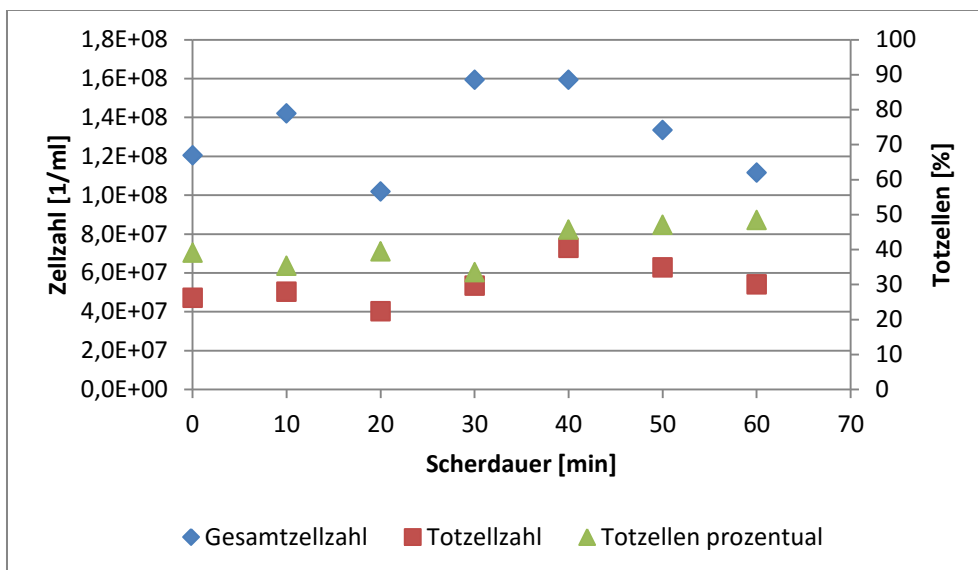


Abbildung 4: Hefezellzahlen nach starker Scherung – Laborversuch 01

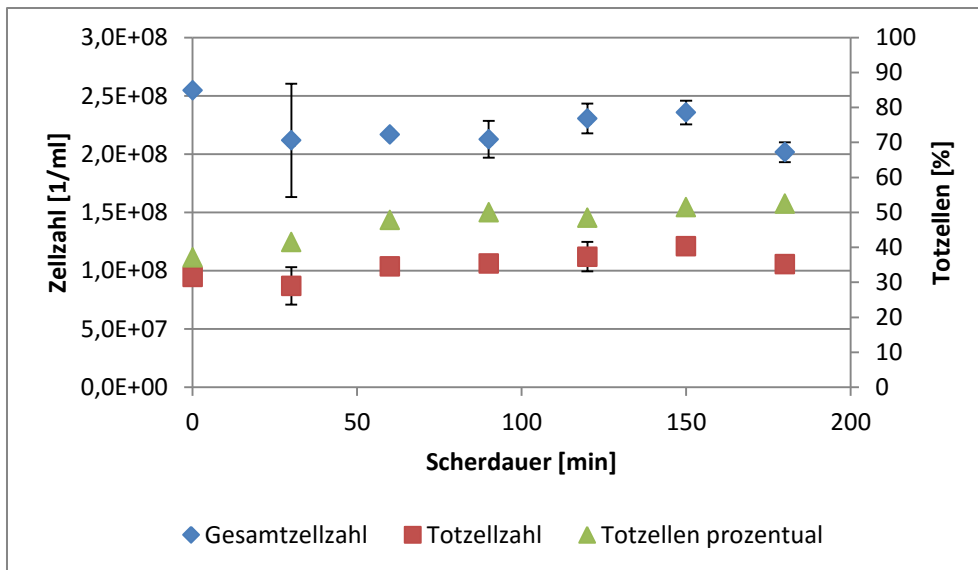


Abbildung 5: Hefezellzahlen nach starker Scherung – Laborversuch 02

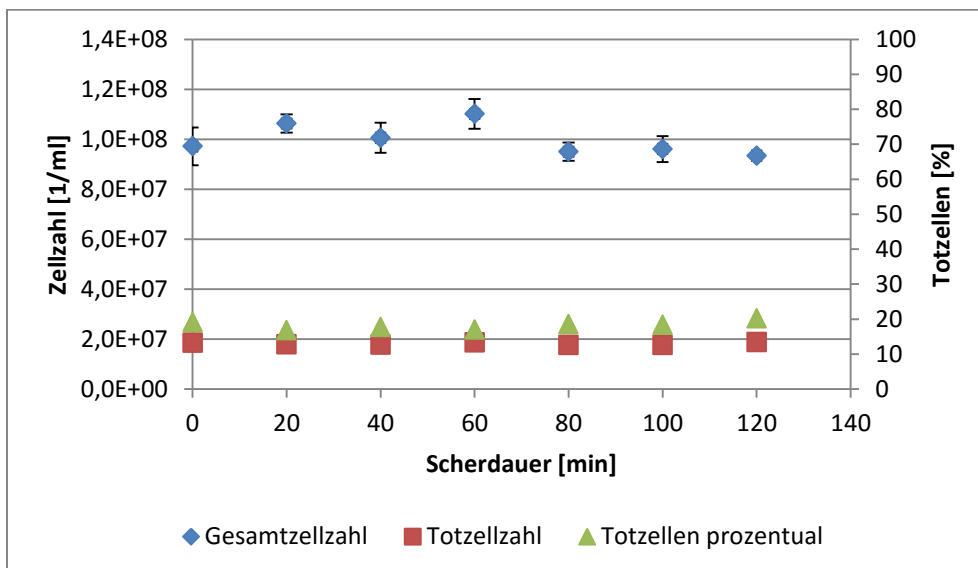


Abbildung 6: Hefezellzahlen nach starker Scherung – Laborversuch 03

### 7.3 Kieselzol-Testmedium, Laborversuche

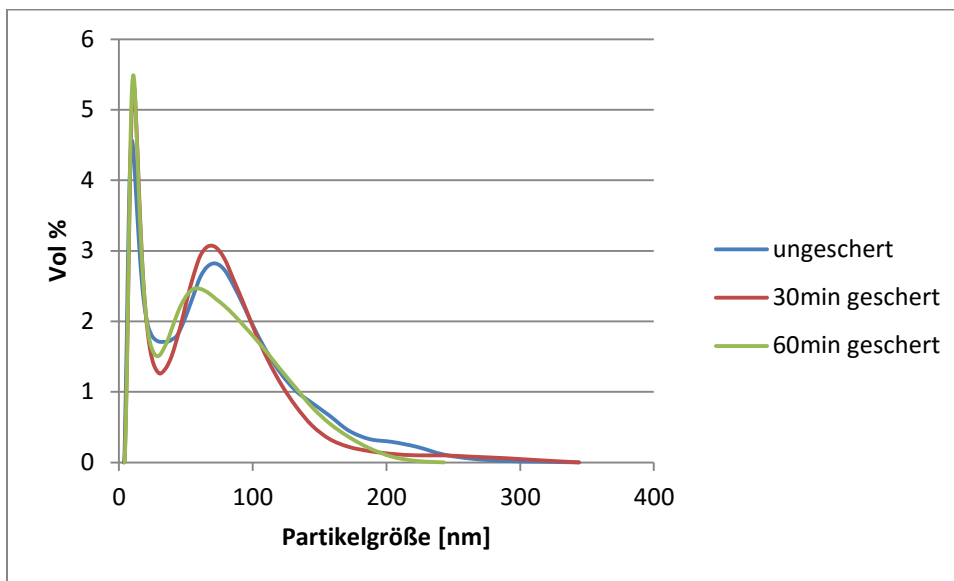


Abbildung 7: Partikelgrößenverteilung in 10 prozentiger Kieselollösung nach 0 Minuten, 30 Minuten und 60 Minuten starker Scherbeanspruchung

### 7.4 Analysenvergleiche zwischen Fluorimetrie und Kolorimetrie

Tabelle 1: Analysenergebnisse mittels kolorimetrischer Schnelltestmethode und fluorimetrischer HPLC-Methode derselben Proben

Methode	Versuch	geschert	$\beta$ -Glucan [mg/L]	$\beta$ -Glucan-Gel [mg/L]	$\beta$ -Glucan-Gel [%]
Kolorimetrie (MEBAK 2.5.4)	A	nein	8817	53	0,60
		ja	5458	4599	45,73
	B	nein	8109	-40	-0,50
		ja	7655	1946	20,27
	C	ja	2060	4040	66,23
	Fluorimetrie (MEBAK 2.5.3)	A	nein	7100	200
ja			2500	5000	66,67
B		nein	7500	0	0,00
		ja	3400	4200	55,26
C		ja	5890	5180	87,95



## 7.5 Pumpenteststrecke

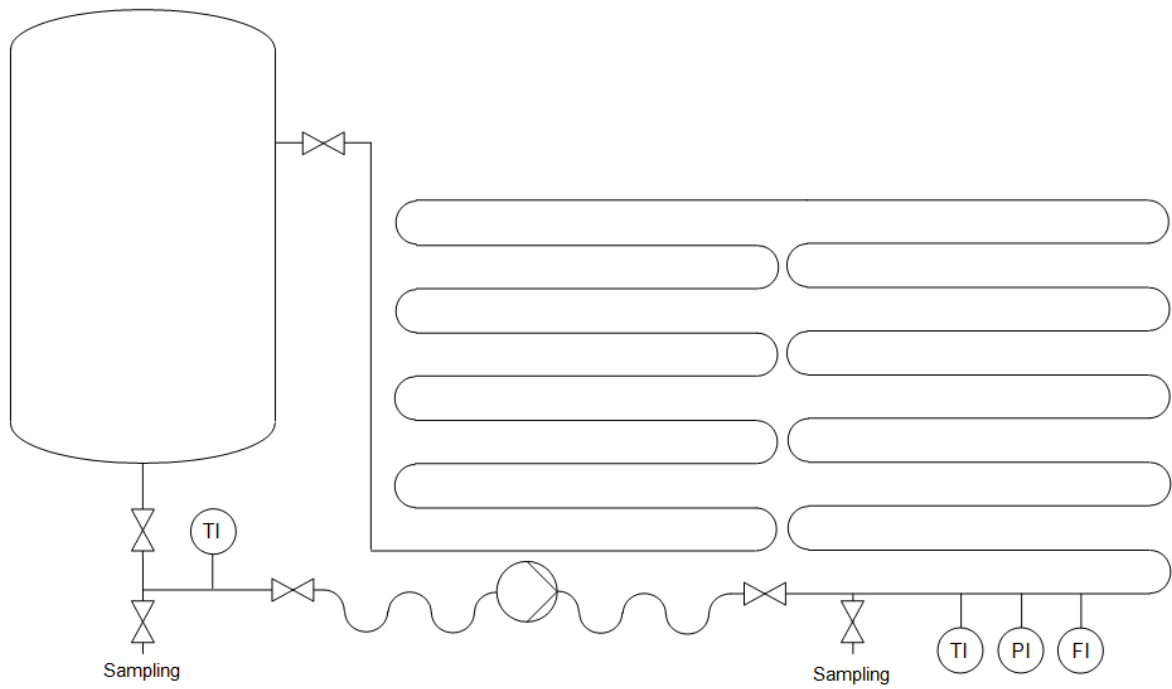


Abbildung 8: Fließbild der Pumpenteststrecke mit Verdeutlichung des Rohrschleifenpakets



Abbildung 9: Pumpenteststrecke am Aufstellungsort in der Studienbrauerei

## 7.6 Anlagenkennlinien der Pumpenteststrecke

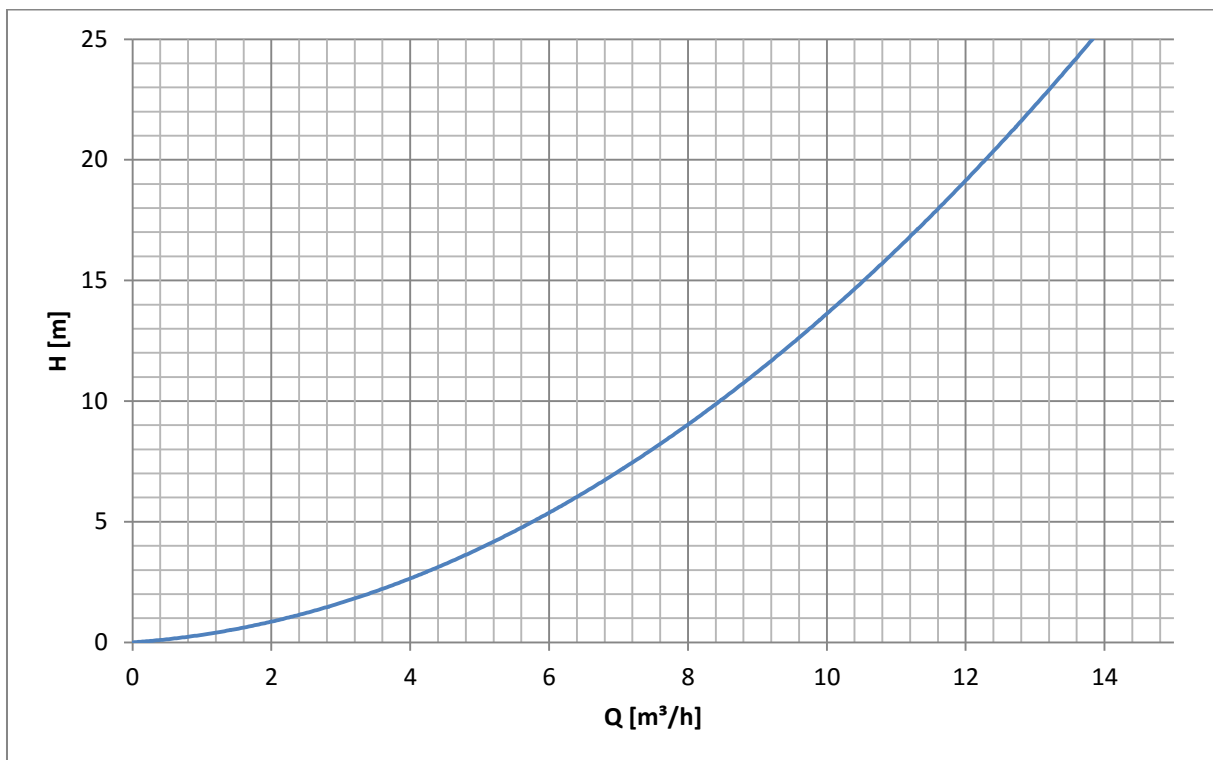


Abbildung 10: Anlagenkennlinie der Pumpenteststrecke, Drosselklappe komplett geöffnet, ohne zusätzliche Einbauten

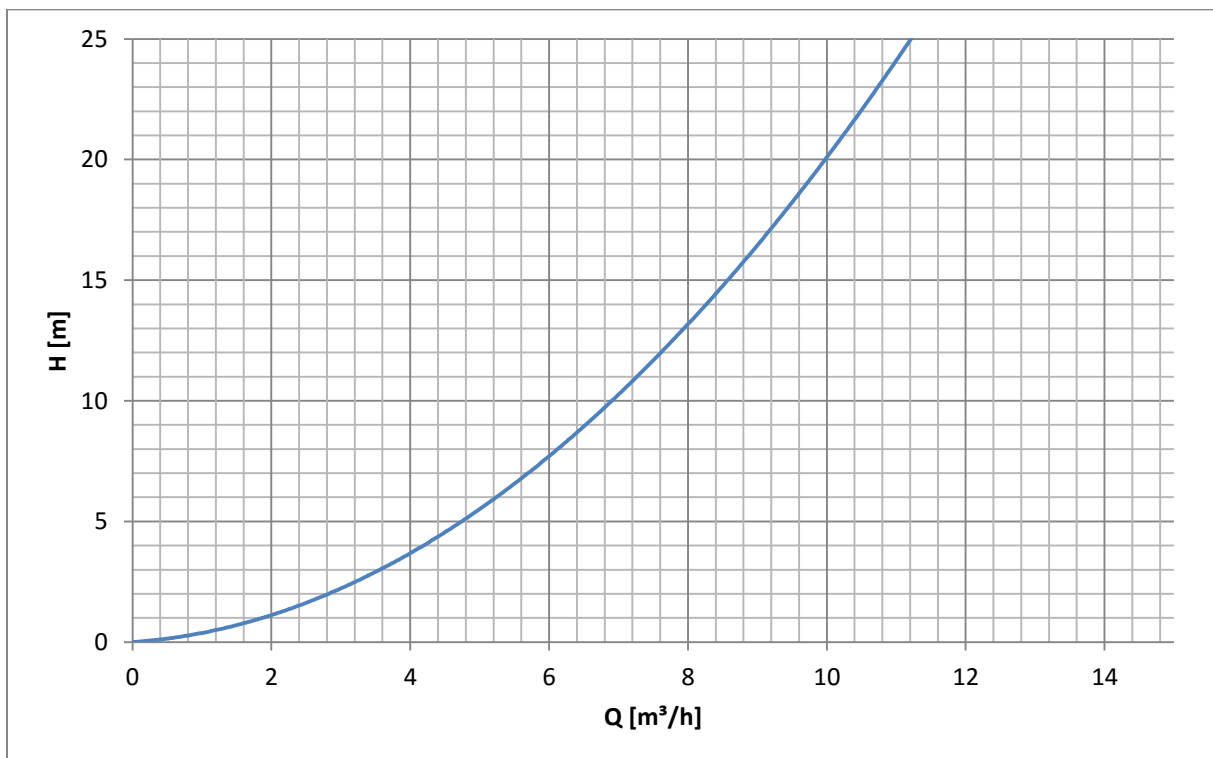


Abbildung 11: Anlagenkennlinie der Pumpenteststrecke, Drosselklappe um 48° geschlossen, ohne zusätzliche Einbauten

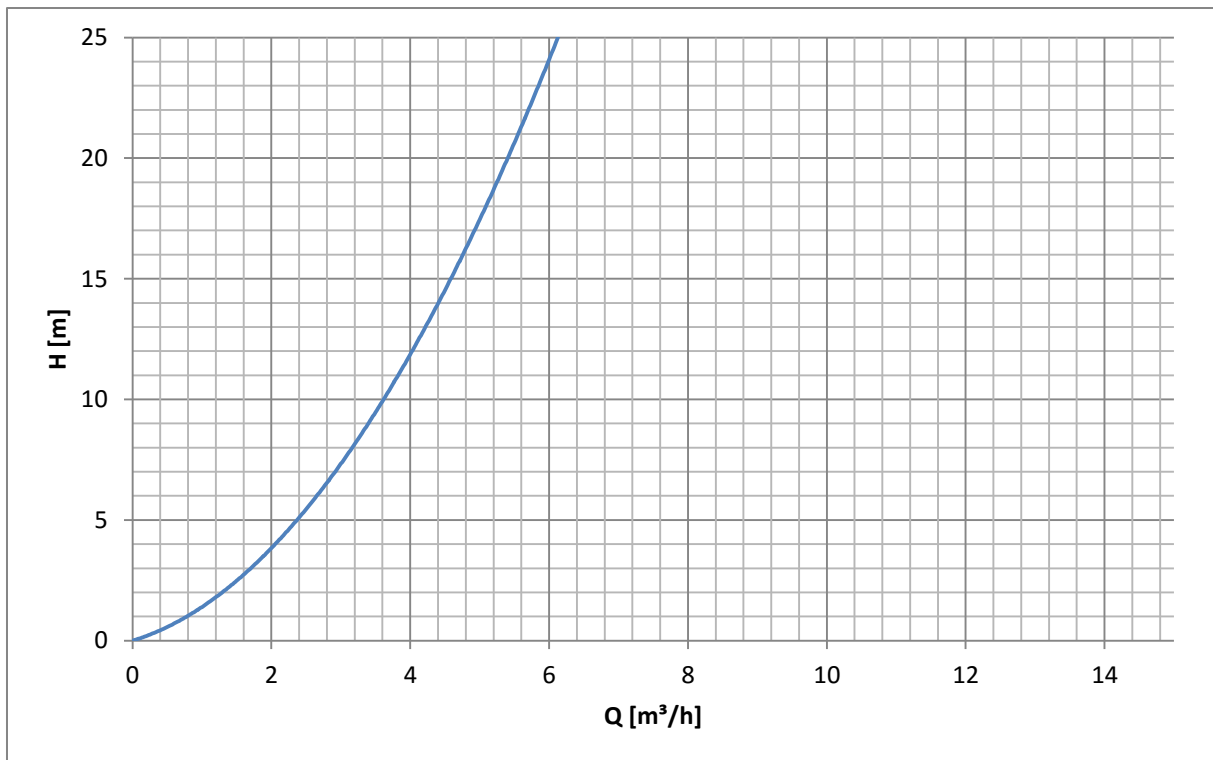


Abbildung 12: Anlagenkennlinie der Pumpenteststrecke, Drosselklappe komplett geöffnet, zusätzliche druckseitige Schlauchverbindung (L=15m, D=20mm)

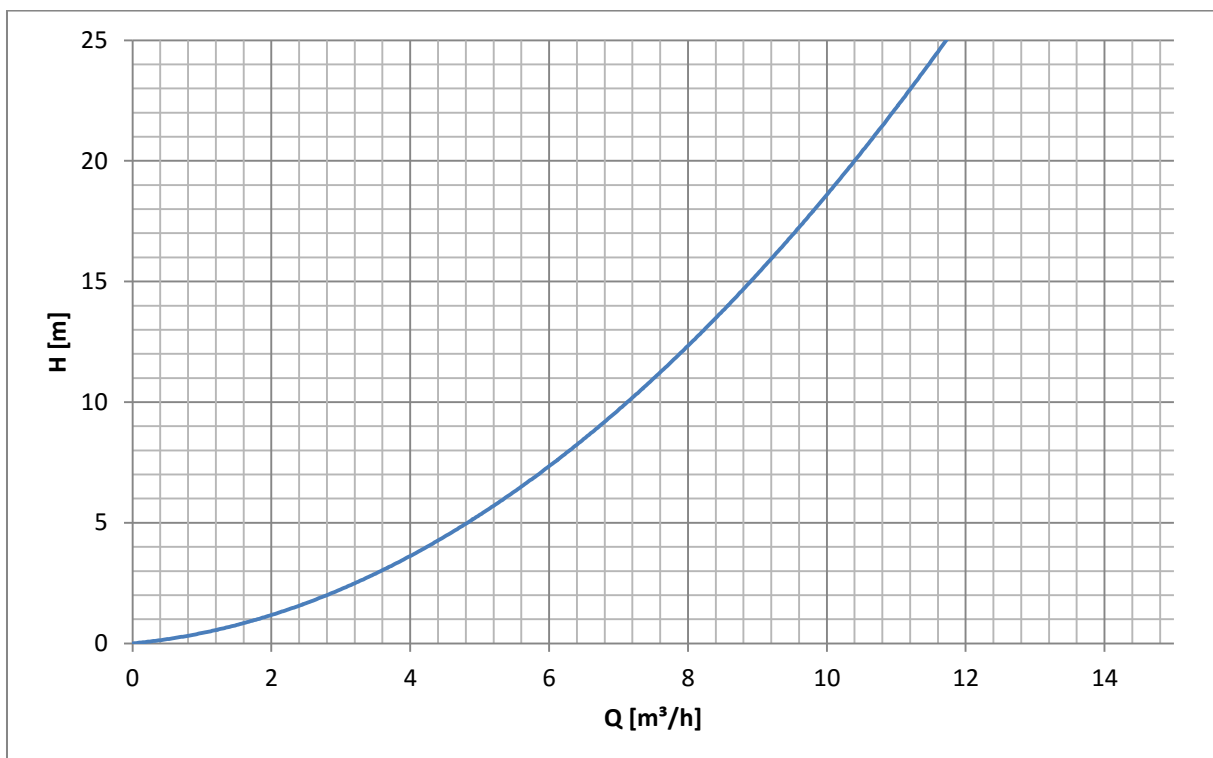


Abbildung 13: Anlagenkennlinie der Pumpenteststrecke, Drosselklappe komplett geöffnet, zusätzliche druckseitige Schlauchverbindung (L=15m, D=32mm)

## 7.7 Scherkraftmischpumpe

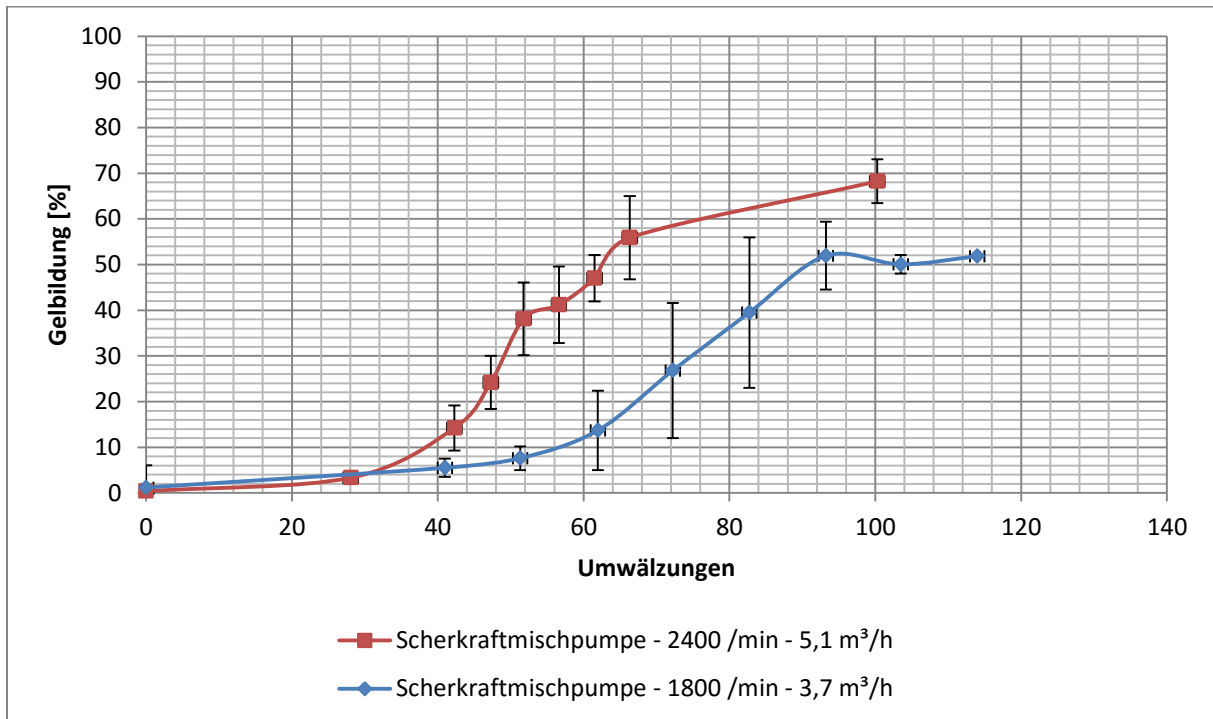


Abbildung 14: Gelbildungskurven der zwei untersuchten Betriebspunkte der Scherkraftmischpumpe, Mittelwerte und Standardabweichungen

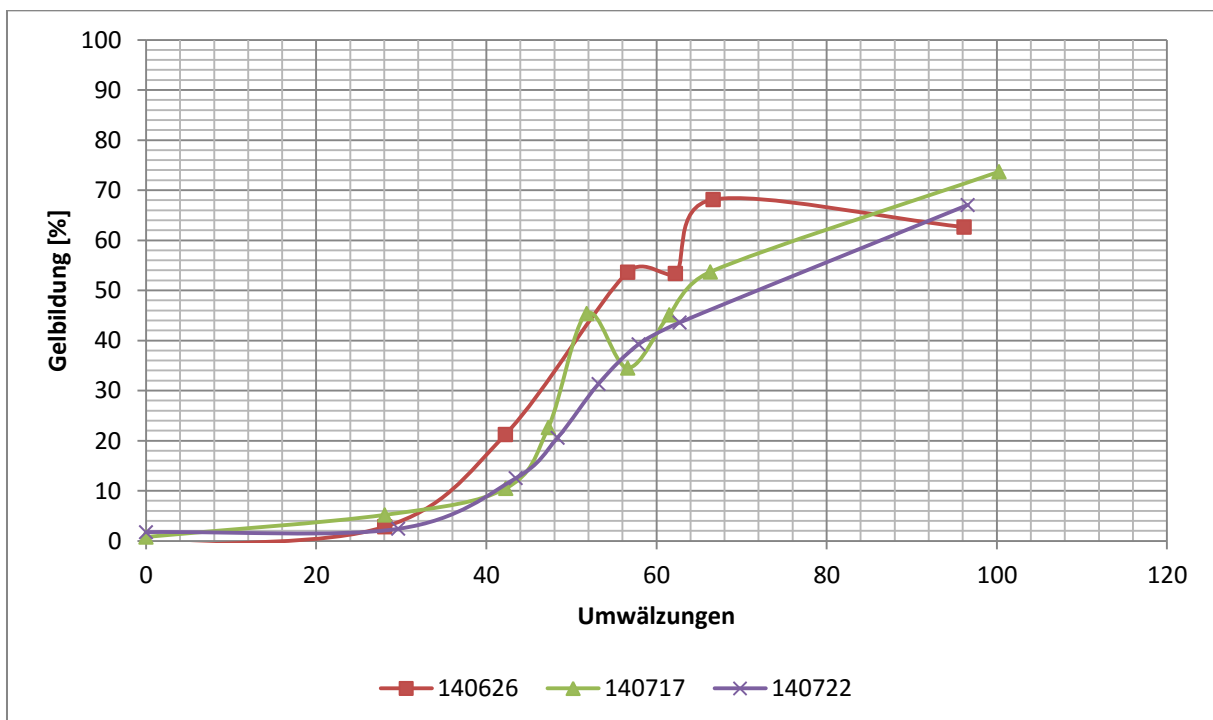


Abbildung 15: Gelbildungskurven der Scherkraftmischpumpe der drei Versuche bei 2400 min<sup>-1</sup>

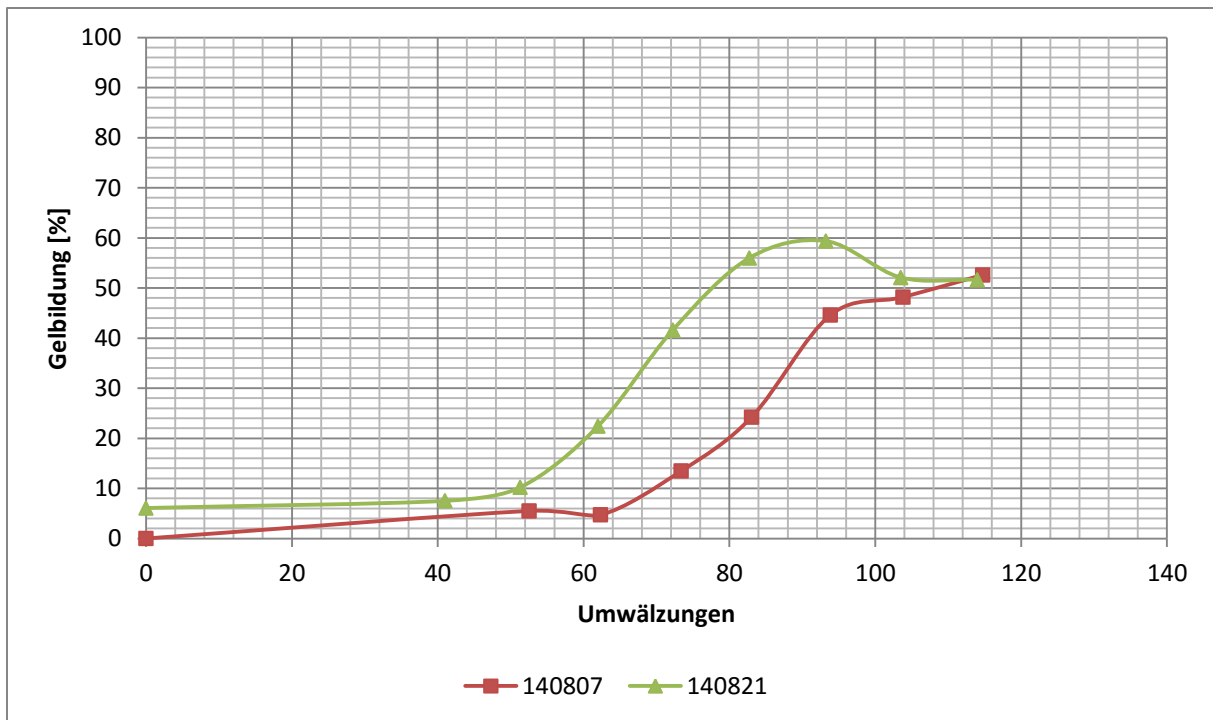


Abbildung 16: Gelbildungskurven der Scherkraftmischpumpe der zwei Versuche bei 1800 min<sup>-1</sup>

## 7.8 Pumpendaten

Tabelle 2: Nominale Daten der untersuchten Pumpen

nominale Daten		Kreiselpumpen			selbstsaugende Kreiselpumpe	Drehkolbenpumpen		Exzenterschnecken- pumpe
		A	B	C		A	B	
Pumpe	Laufraddurchmesser [mm]	126	150	130	130	k.A.	k.A.	k.A.
	Rotorausführung	offen	offen	offen	offen	4-flügelig	3-flügelig	k.A.
	Drehzahl [1/min]	2890	2900	2875	2900	457	705	321
	H [m]	20	20	19,9	19,6	20	20	40
	Q [m <sup>3</sup> /h]	10	10	9,99	9,91	10	10	20
	DN Saug	50	40	40	65	65	40	80
	DN Druck	40	40	40	40	65	40	80
Motor	Drehzahl [1/min]	2890	2900	2875	2900	1425	1455	1460
	P [kW]	2,2	1,5	1,5	3,0	3,0	2,2	5,5
	I [A]	4,44	3,1	3,0	5,5	6,59	4,65	10,7
	U [V]	400	400	400	400	400	400	400
	f [Hz]	50	50	50	50	50	50	50
	cos φ	0,85	0,83	0,85	0,9	0,77	0,81	0,84
	IE [%]	83,2	84,1	84,2	87,1	85,5	84,3	87,7
	IE Class	2	2	3	3	2	2	2

## 7.9 Selbstsaugende Kreiselpumpe

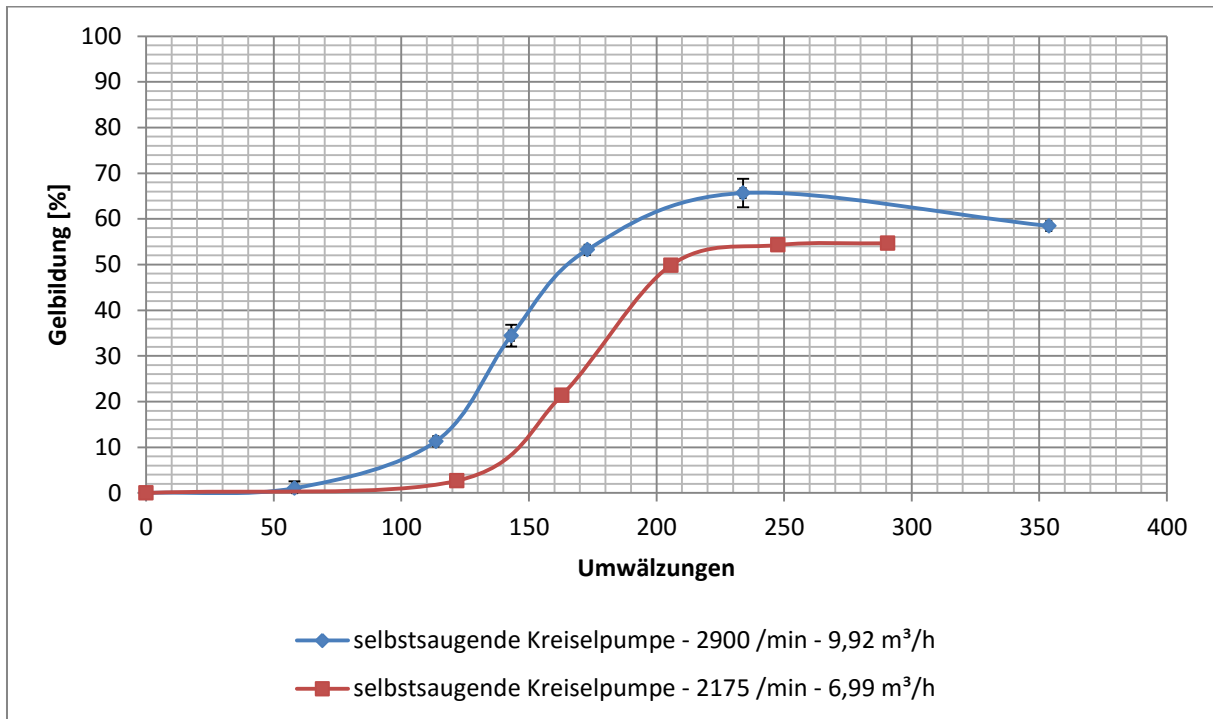


Abbildung 17: Gelbildungskurven der zwei untersuchten Betriebspunkte der selbstsaugenden Kreiselpumpe, Mittelwerte und Standardabweichungen,  $\beta$ -Glucan-Charge #A01

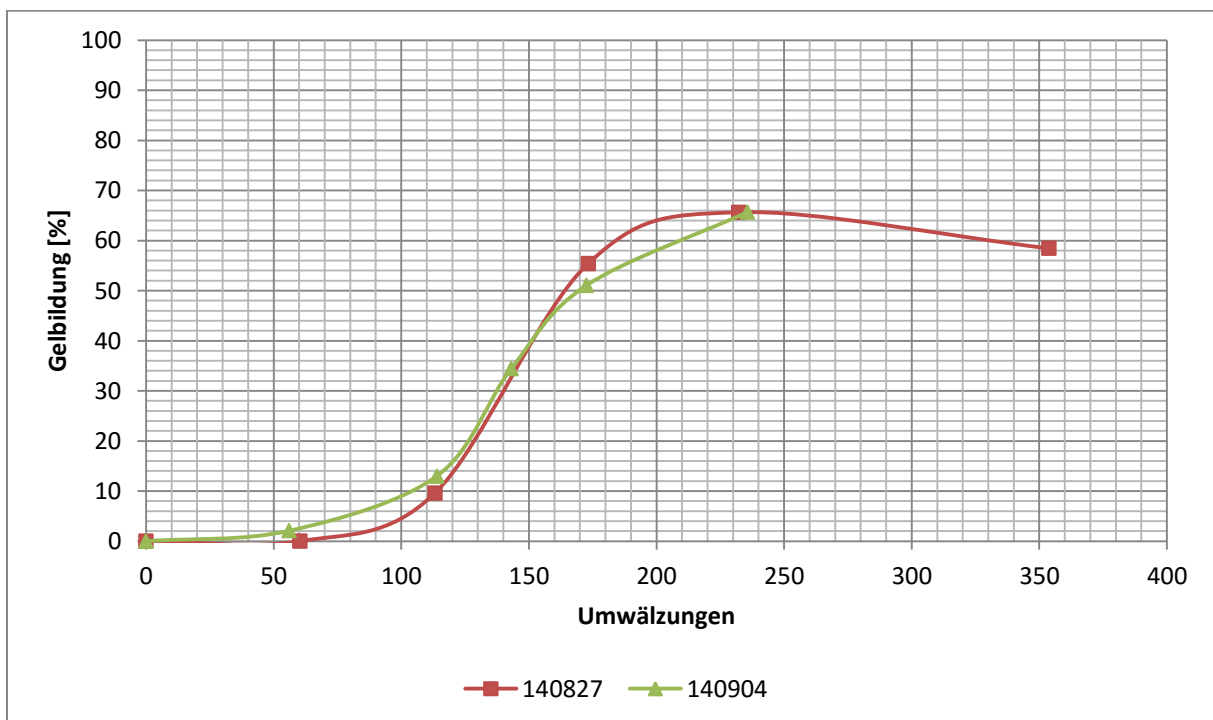


Abbildung 18: Gelbildungskurven der selbstsaugenden Kreiselpumpe der zwei Versuche bei  $2900 \text{ min}^{-1}$ ,  $\beta$ -Glucan-Charge #A01

## 7.10 Unterschiede in $\beta$ -Glucan-Chargen

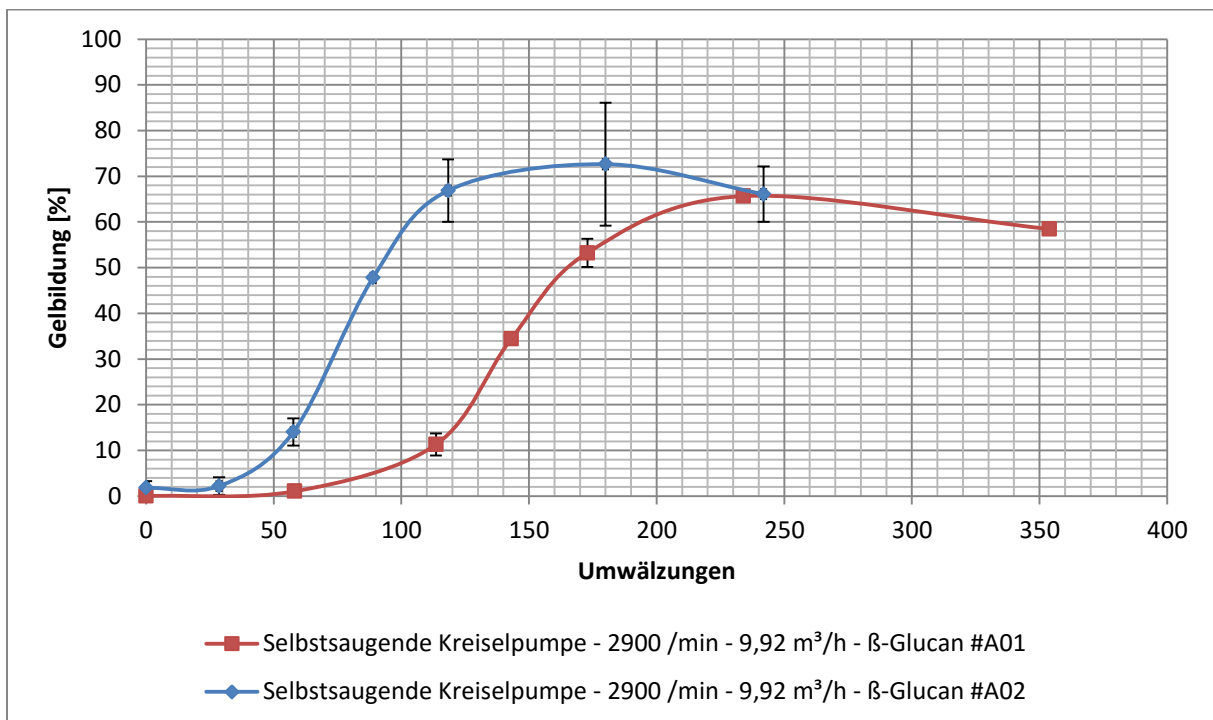


Abbildung 19: Gelbildungskurven der selbstsaugenden Kreiselpumpe bei  $2900 \text{ min}^{-1}$  bei gleichen Versuchsbedingungen mit unterschiedlichen  $\beta$ -Glucan-Chargen, Mittelwerte und Standardabweichungen

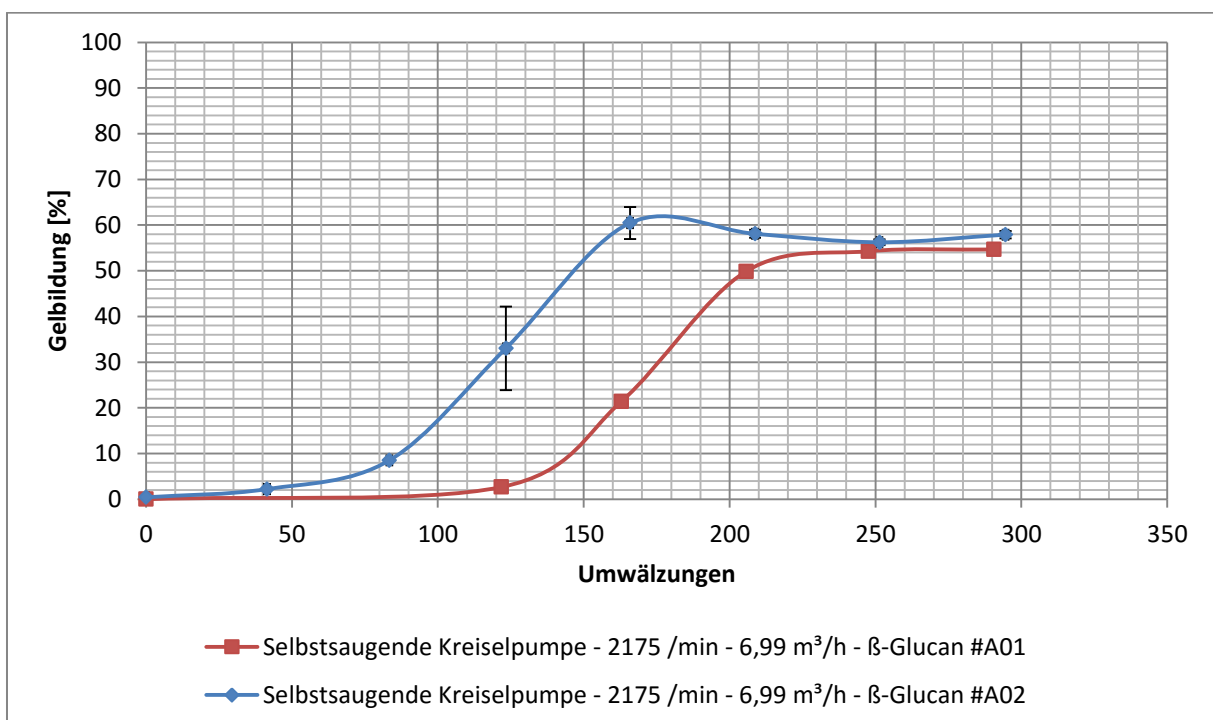


Abbildung 20: Gelbildungskurven der selbstsaugenden Kreiselpumpe bei  $2175 \text{ min}^{-1}$  bei gleichen Versuchsbedingungen mit unterschiedlichen  $\beta$ -Glucan-Chargen, Mittelwerte und Standardabweichungen

## 7.11 Normalsaugende Kreiselpumpe A

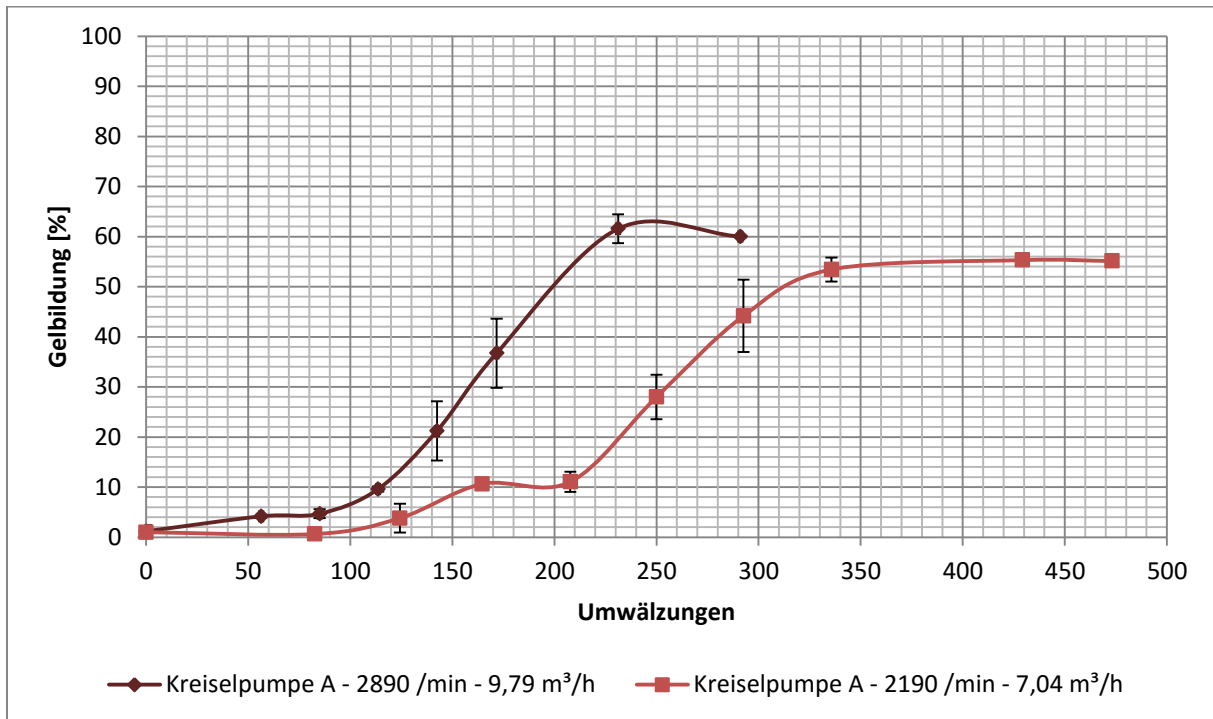


Abbildung 21: Gelbildungskurven der zwei untersuchten Betriebspunkte der (normalsaugenden) Kreiselpumpe A, Mittelwerte und Standardabweichungen,  $\beta$ -Glucan-Charge #A02

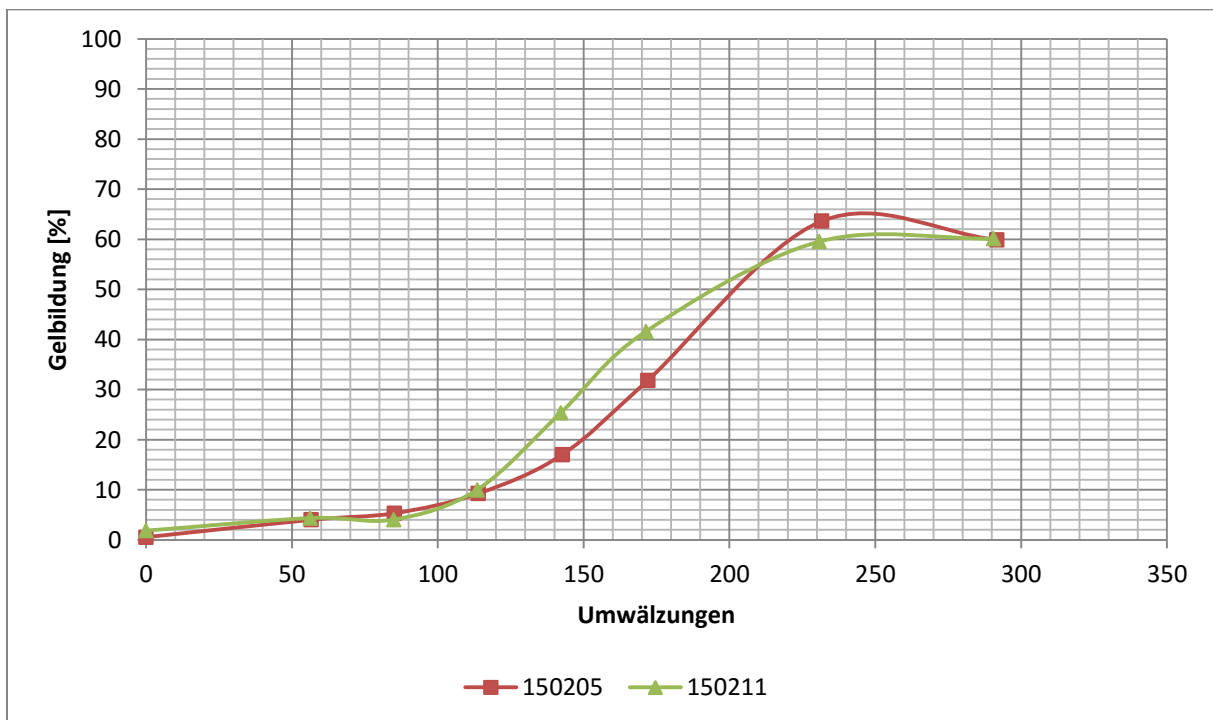


Abbildung 22: Gelbildungskurven der (normalsaugenden) Kreiselpumpe A der zwei Versuche bei 2890  $\text{min}^{-1}$ ,  $\beta$ -Glucan-Charge #A02



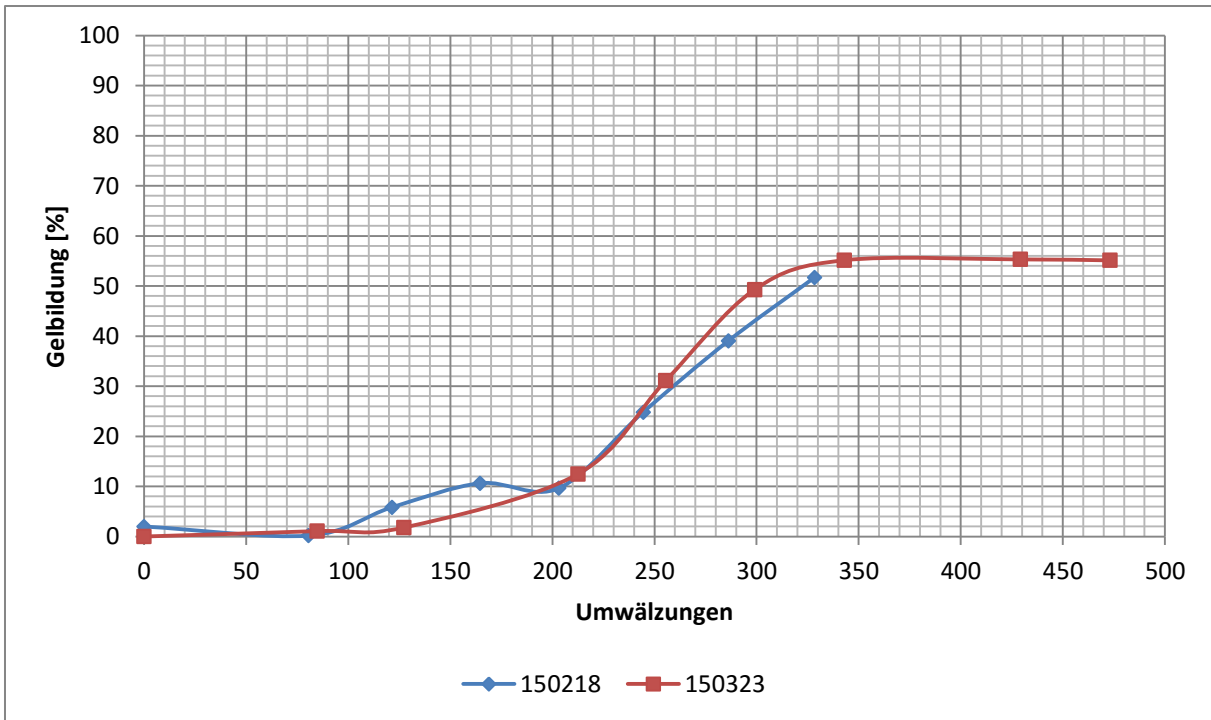


Abbildung 23: Gelbildungskurven der (normalsaugenden) Kreislpumpe A der zwei Versuche bei 2190 min<sup>-1</sup>, β-Glucan-Charge #A02

## 7.12 Volumenstrombeeinflussung – Frequenzumrichter vs. Drossel

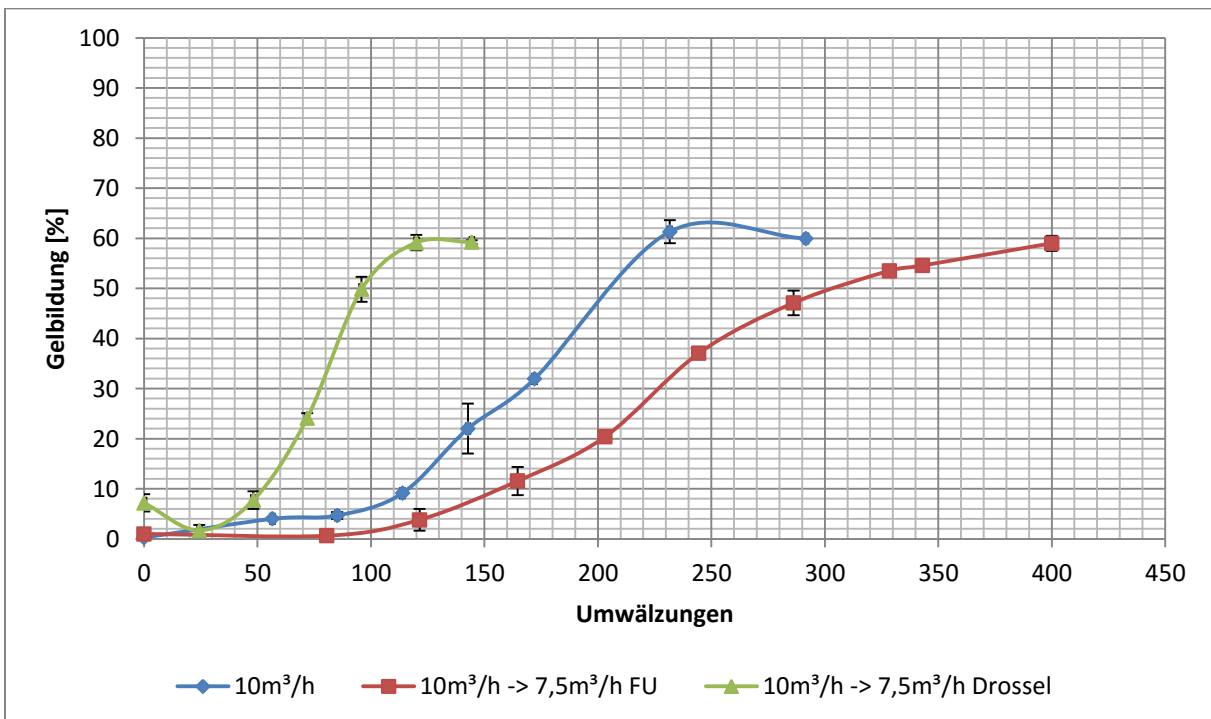


Abbildung 24: Vergleich von Möglichkeiten zur Volumenstrombeeinflussung und deren Auswirkung auf die Scherbeanspruchung, Untersuchungsobjekt: Kreislpumpe A, Mittelwerte und Standardabweichung

### 7.13 Drehkolbenpumpen

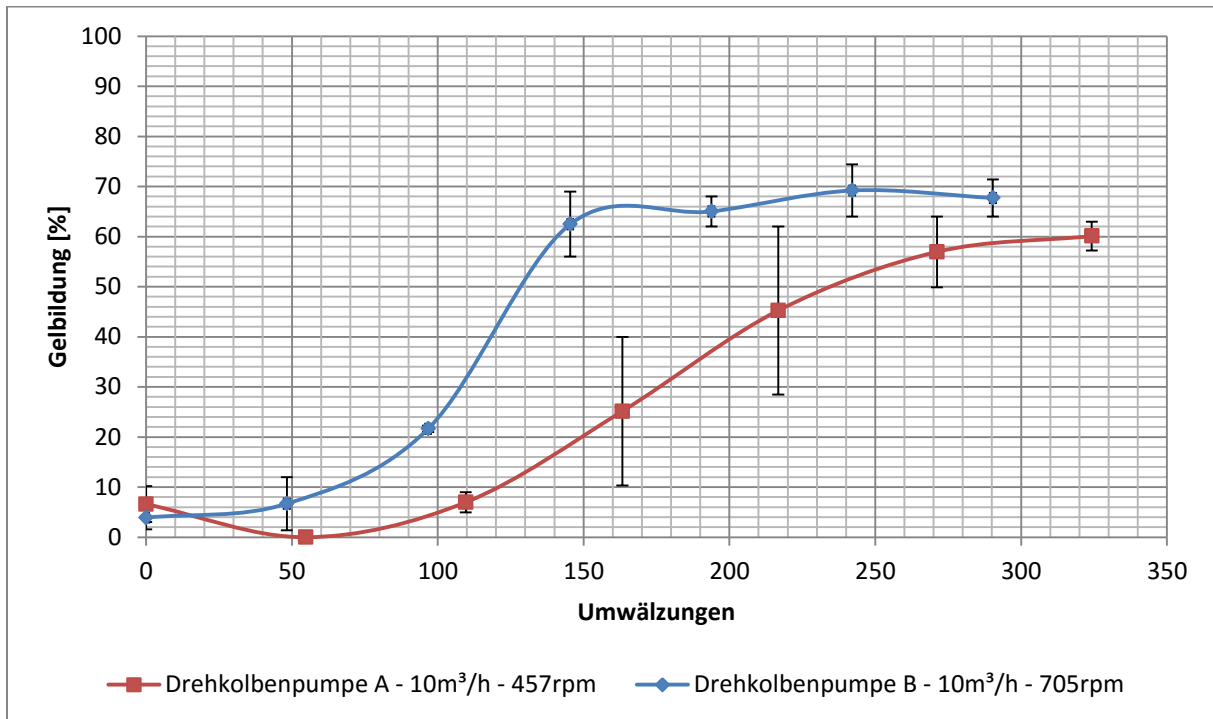


Abbildung 25: Gelbildungskurven der zwei untersuchten Drehkolbenpumpen bei nominalem Betriebspunkt, Mittelwerte und Standardabweichungen,  $\beta$ -Glucan-Charge #B01

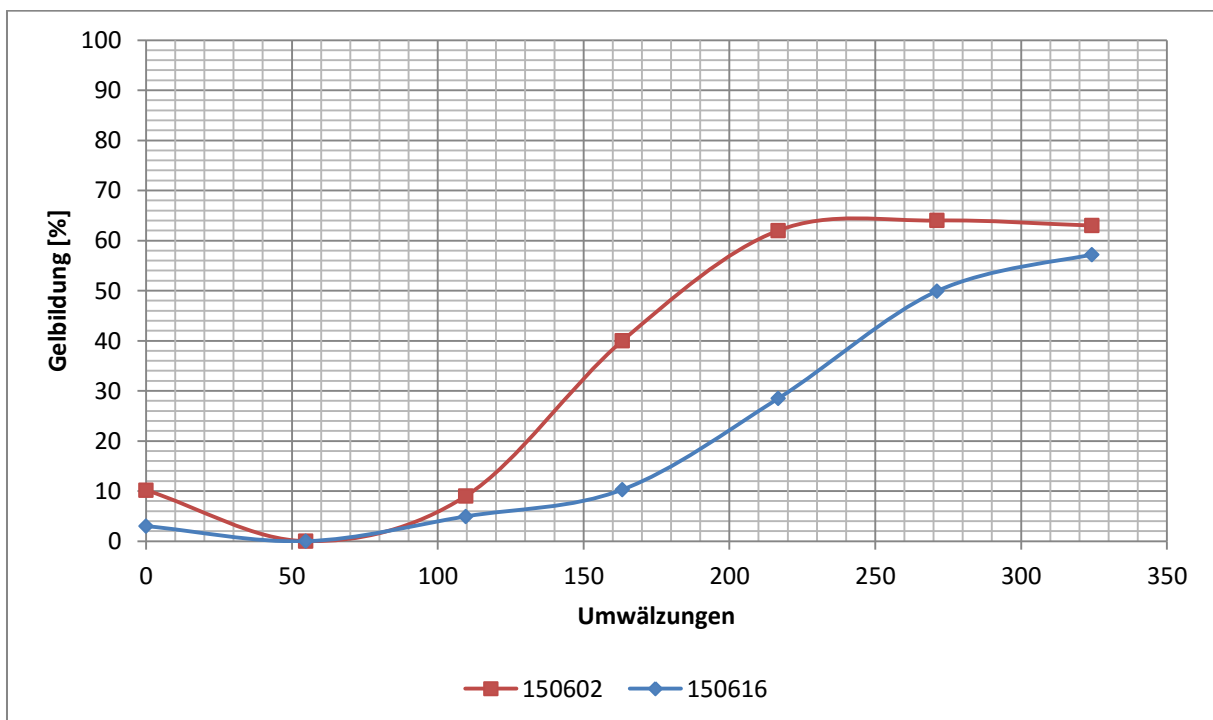


Abbildung 26: Gelbildungskurven der Drehkolbenpumpe A der zwei Versuche bei nominalem Betriebspunkt ( $457 \text{ min}^{-1}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $20 \text{ m}$ ),  $\beta$ -Glucan-Charge #B01

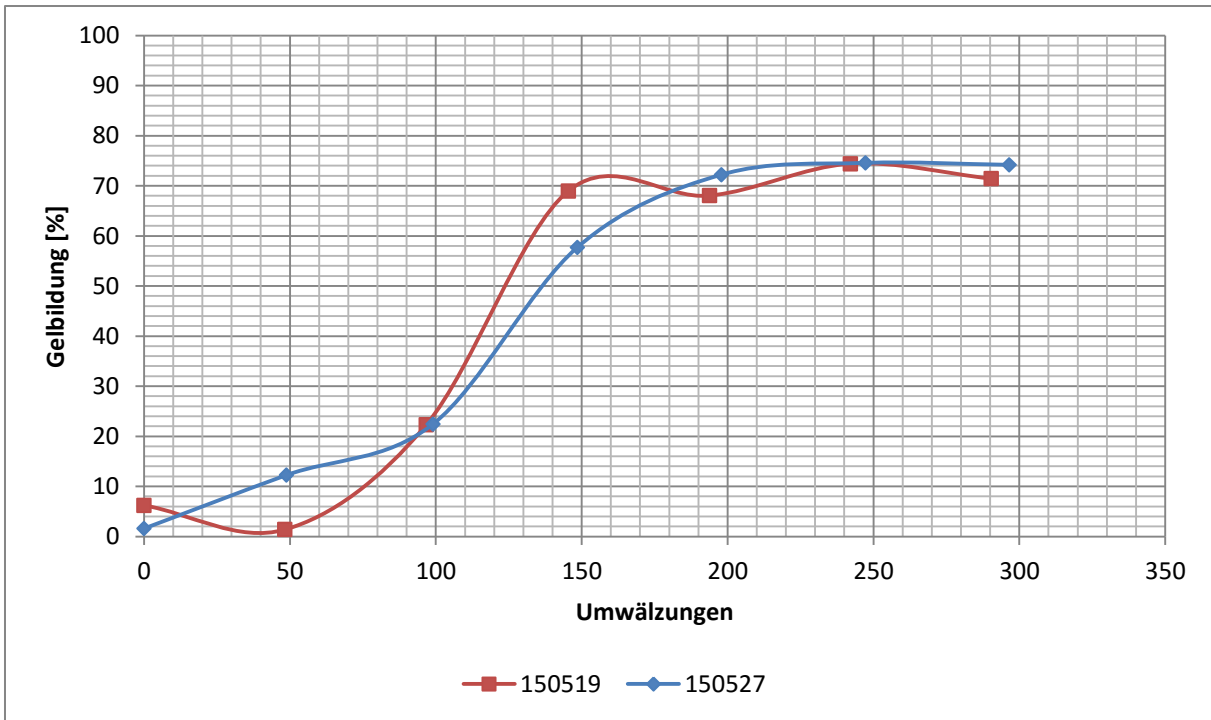


Abbildung 27: Gelbildungskurven der Drehkolbenpumpe B der zwei Versuche bei nominalem Betriebspunkt ( $705 \text{ min}^{-1}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $20 \text{ m}$ ),  $\beta$ -Glucan-Charge #B01

### 7.14 Exzentrerschneckenpumpe

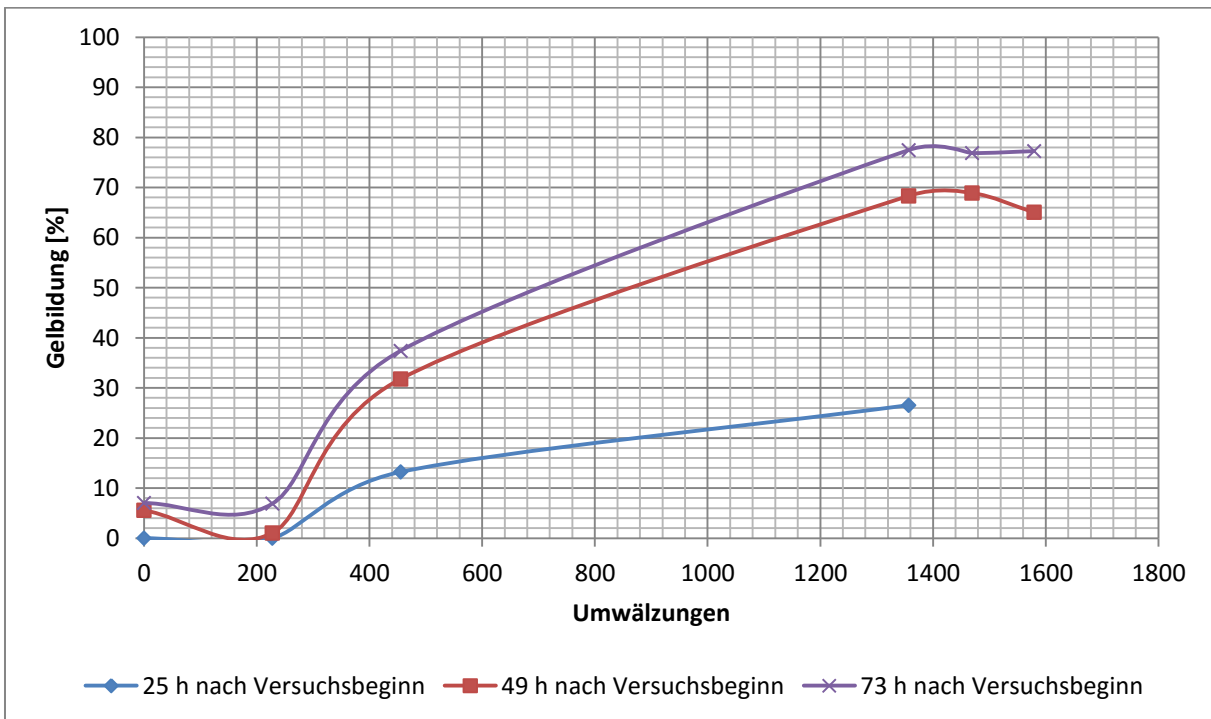


Abbildung 28: Gelbildungskurven des ersten Versuchs mit der Exzentrerschneckenpumpe mit  $Q=10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=20 \text{ m}$  nach verschiedener Lagerdauer zwischen Probenahme und Analyse,  $\beta$ -Glucan-Charge #B01

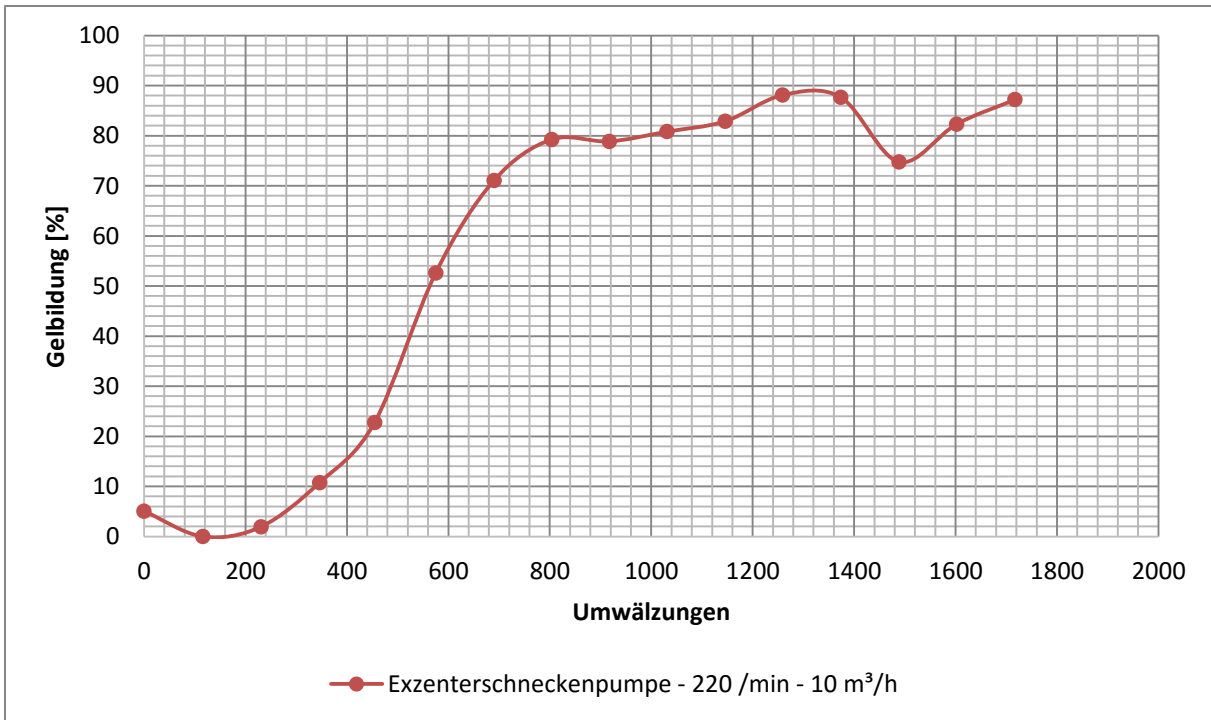


Abbildung 29: Gelbildungskurve der Exzentrerschneckenpumpe mit  $Q=10\text{m}^3/\text{h}$ ,  $H=20\text{m}$  nach 8 Tagen Lagerung bei  $4\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\beta$ -Glucan-Charge #B02

### 7.15 Einfluss der Lagertemperatur – Gelrückbildung

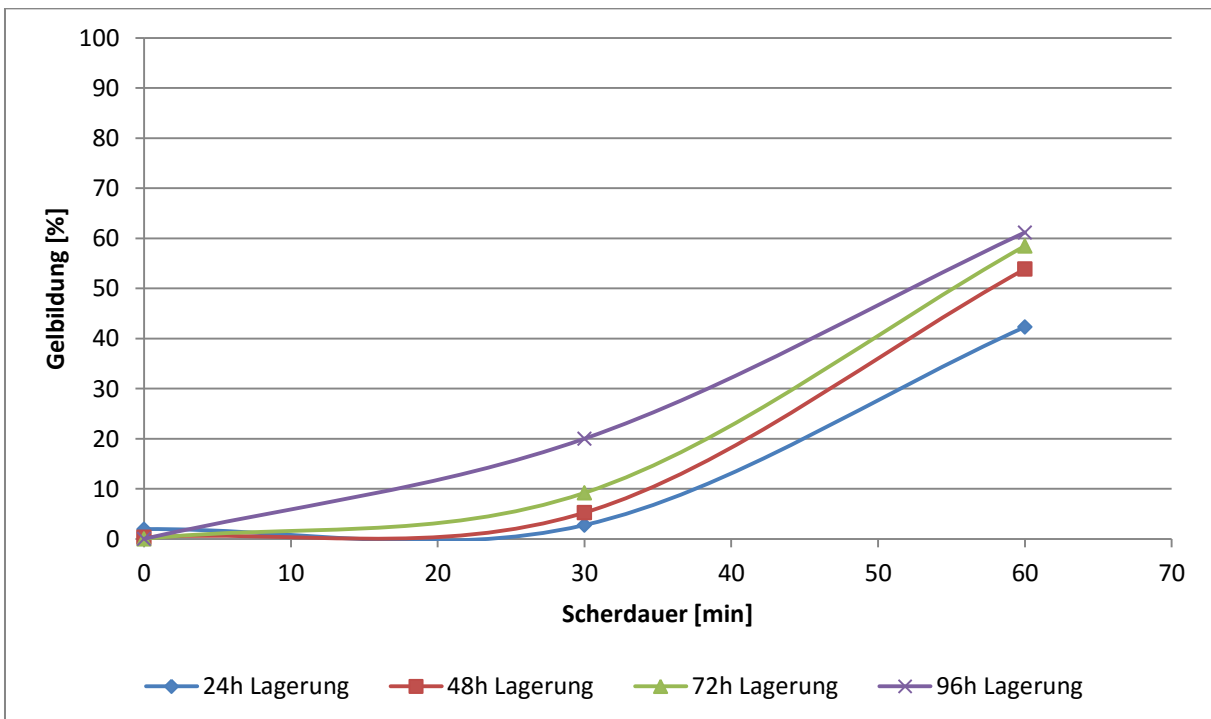


Abbildung 30: Laborscherversuch, Analyse nach unterschiedlicher Lagerdauer bei  $4\text{ }^\circ\text{C}$

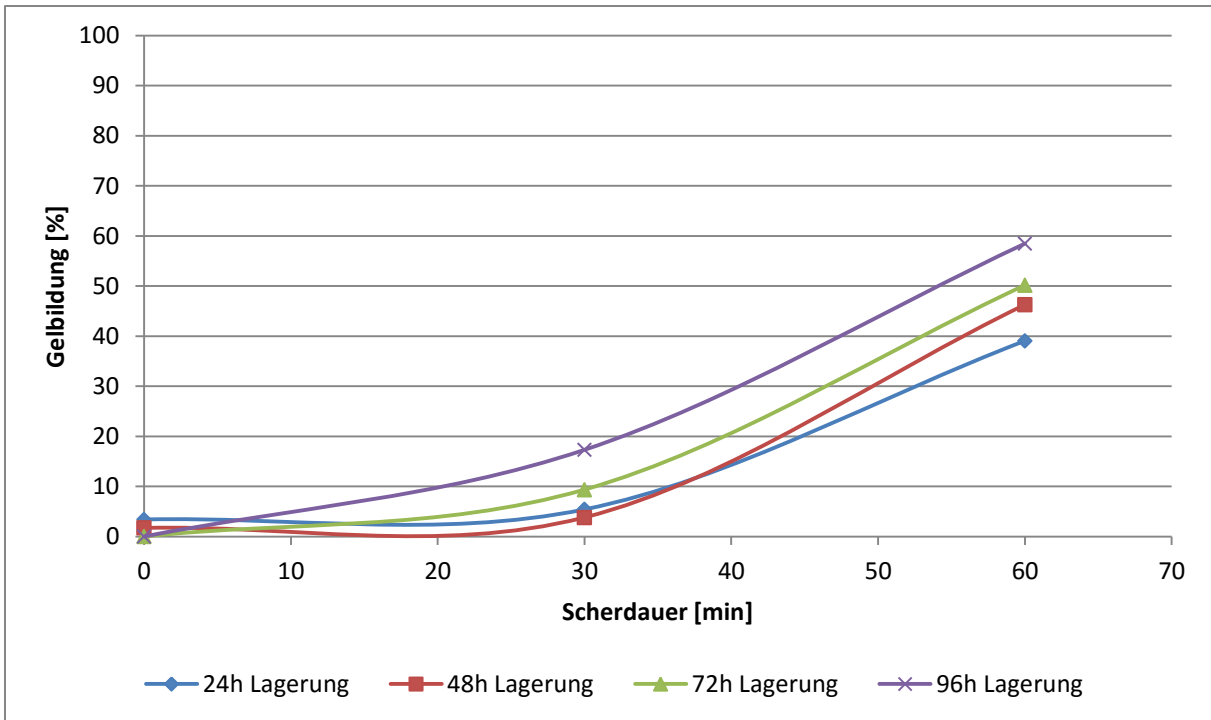


Abbildung 31: Laborscherversuch, Analyse nach unterschiedlicher Lagerdauer bei 21 °C

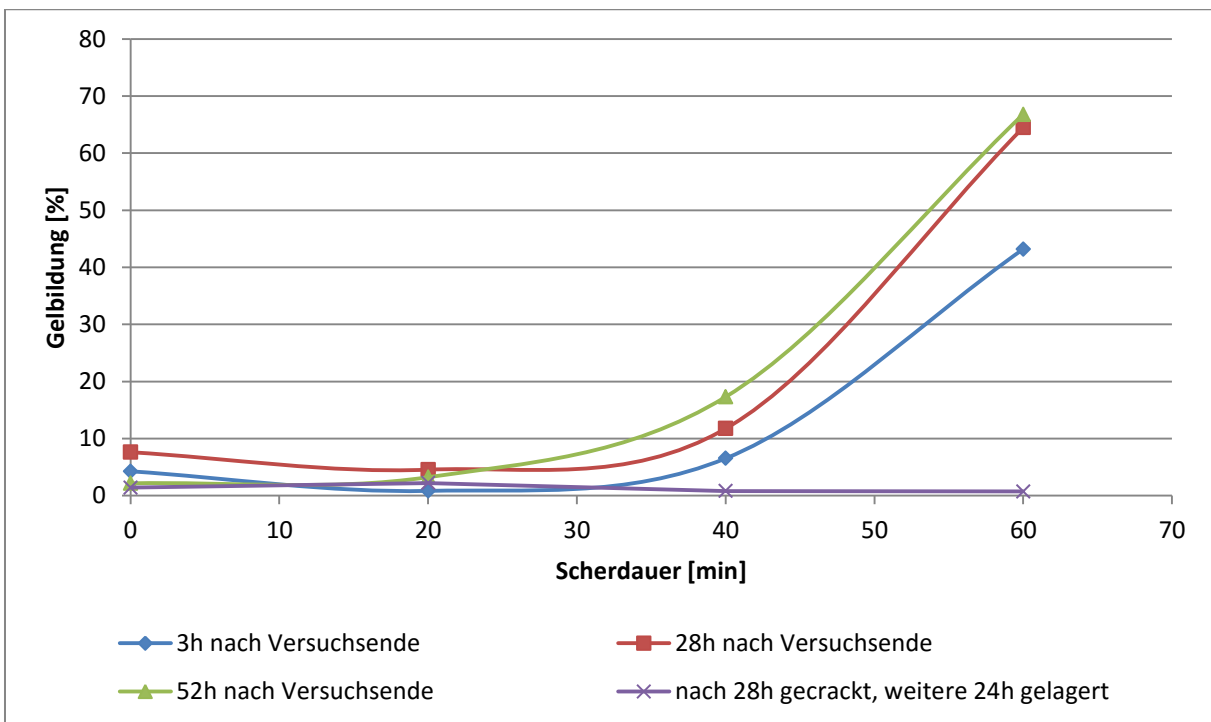


Abbildung 32: Laborscherversuch, Analyse nach unterschiedlicher Lagerdauer bei 4 °C, Auflösung der Gele einer Teilprobe durch Erhitzen nach 28h Lagerung, danach nochmalige Lagerung über 24 h bei 4 °C

## 7.16 Normalsaugende Kreiselpumpen

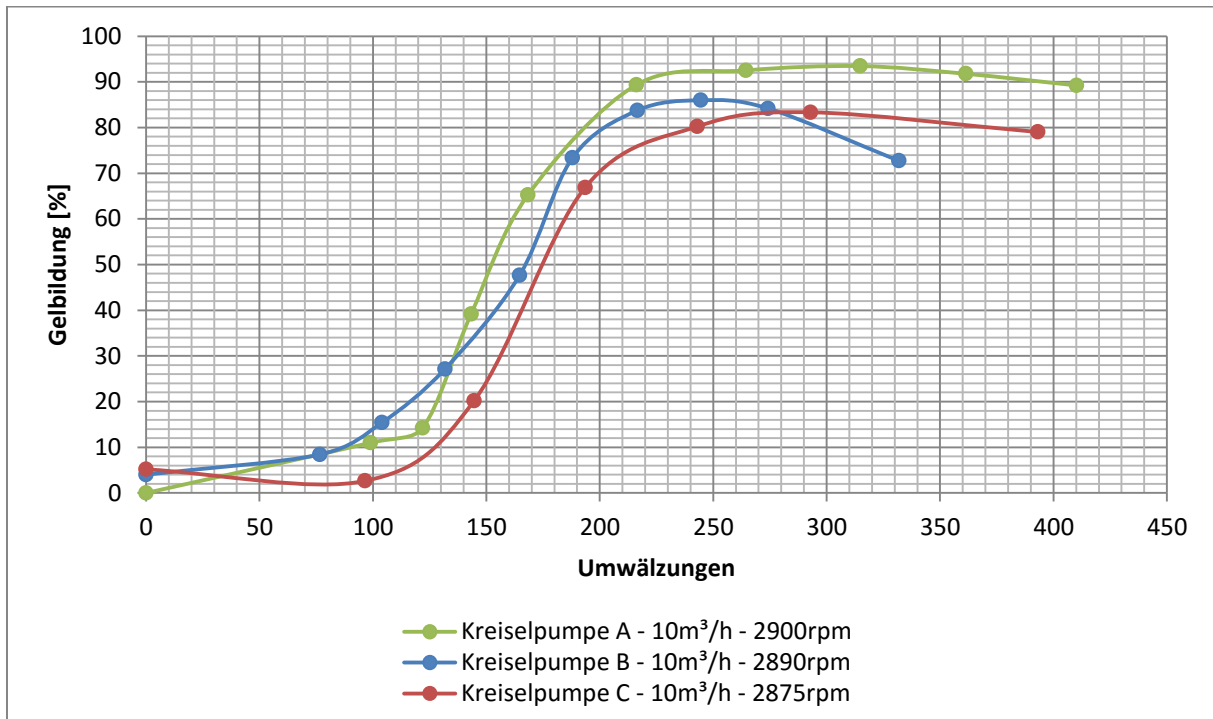


Abbildung 33: Vergleich dreier normalsaugender Kreiselpumpen bei nominalem Betriebspunkt,  $\beta$ -Glucan-Charge #B02

## 7.17 Auswirkungen der Veränderung der Pumpenkennlinie

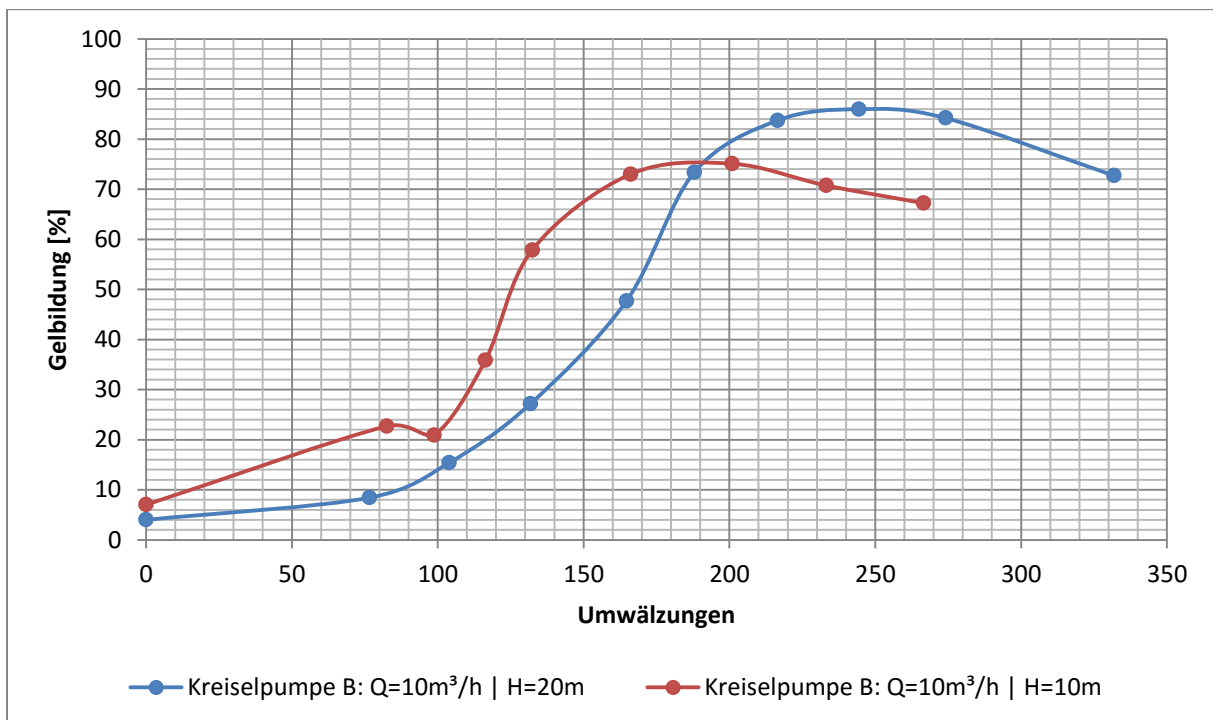


Abbildung 34: Gelbildungskurven der Kreiselpumpe B unter Verwendung zweier verschieden große Laufräder und damit zweier verschiedener nominaler Betriebspunkte, Charge #B02

## 7.18 Auswirkungen der Veränderung der Anlagenkennlinie

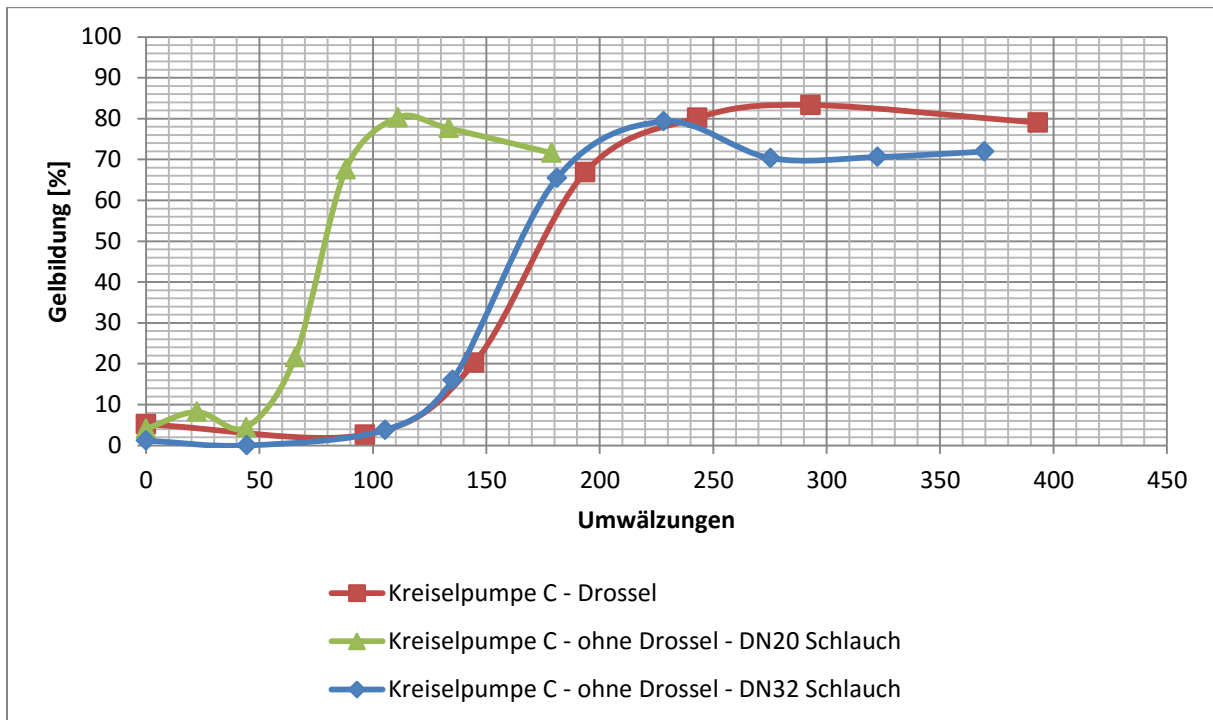


Abbildung 35: Gelbildungskurven der Kreiselpumpe C bei verschiedenen Anlagenwiderständen und damit verschiedenen Volumenströmen und Fließgeschwindigkeiten,  $\beta$ -Glucan-Charge #B02

## 7.19 Scherbelastungskennlinie

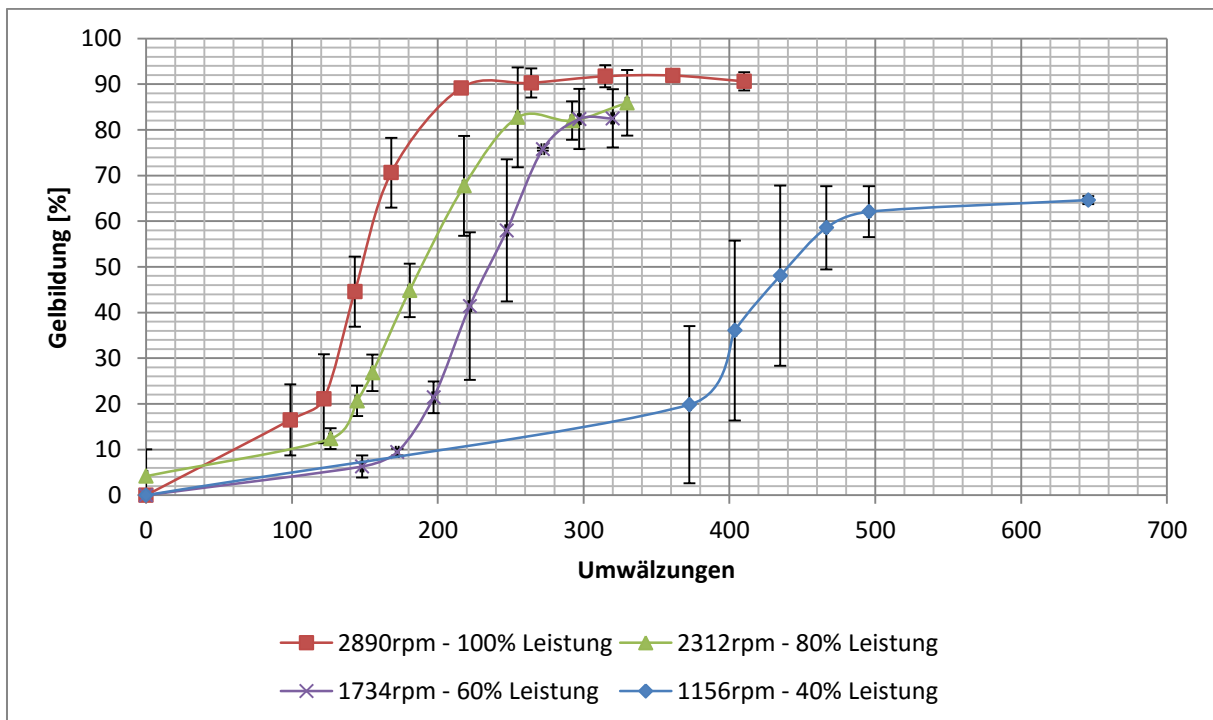


Abbildung 36: Verschiedene über den Frequenzumrichter eingestellte Betriebspunkte der Kreiselpumpe A, Mittelwerte und Standardabweichungen,  $\beta$ -Glucan-Charge #B02

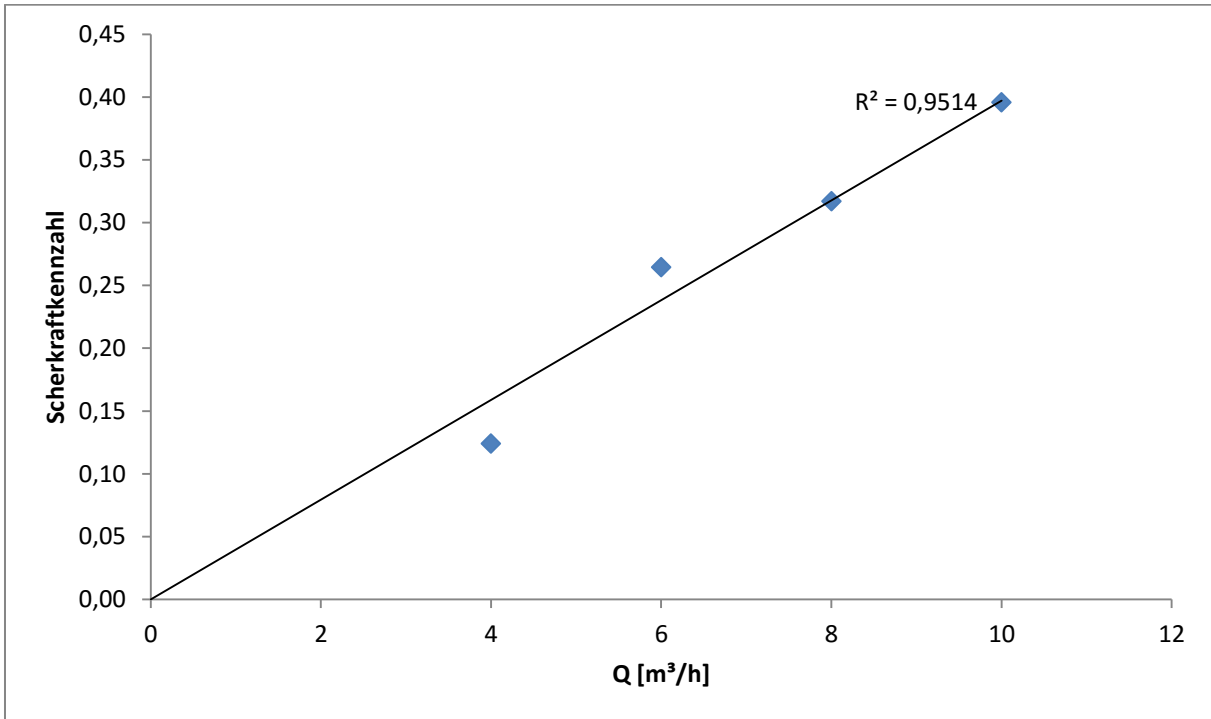


Abbildung 37: Über die vier verschiedenen Betriebspunkte der Kreiselpumpe A ermittelten Scherkraftkennzahlen, beispielhaft aufgetragen als Scherbelastungskennlinie

## 7.20 Zusammenhang – Gelbildung und Volumenstrom

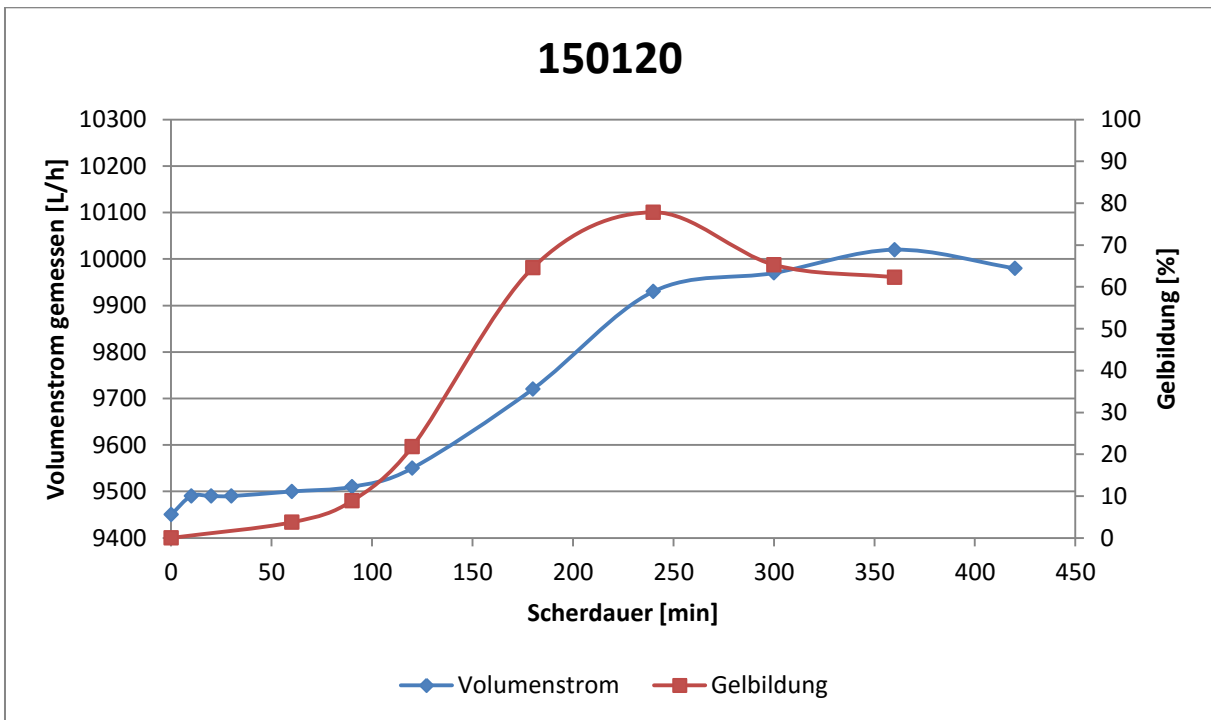


Abbildung 38: Volumenstrom und Gelbildung – normalsaugende Kreiselpumpe A, nominaler Betriebspunkt,  $\beta$ -Glucan-Charge #A02



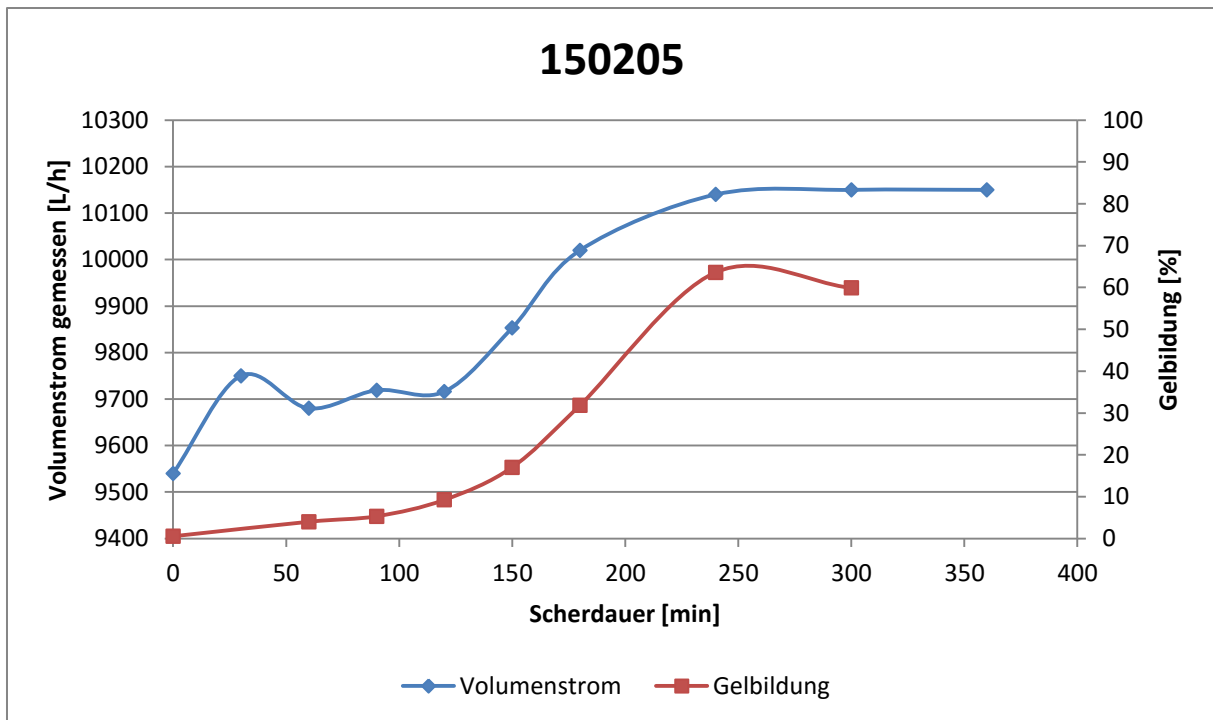


Abbildung 39: Volumenstrom und Gelbildung – normalsaugende Kreiselpumpe A, nominaler Betriebspunkt,  $\beta$ -Glucan-Charge #A02

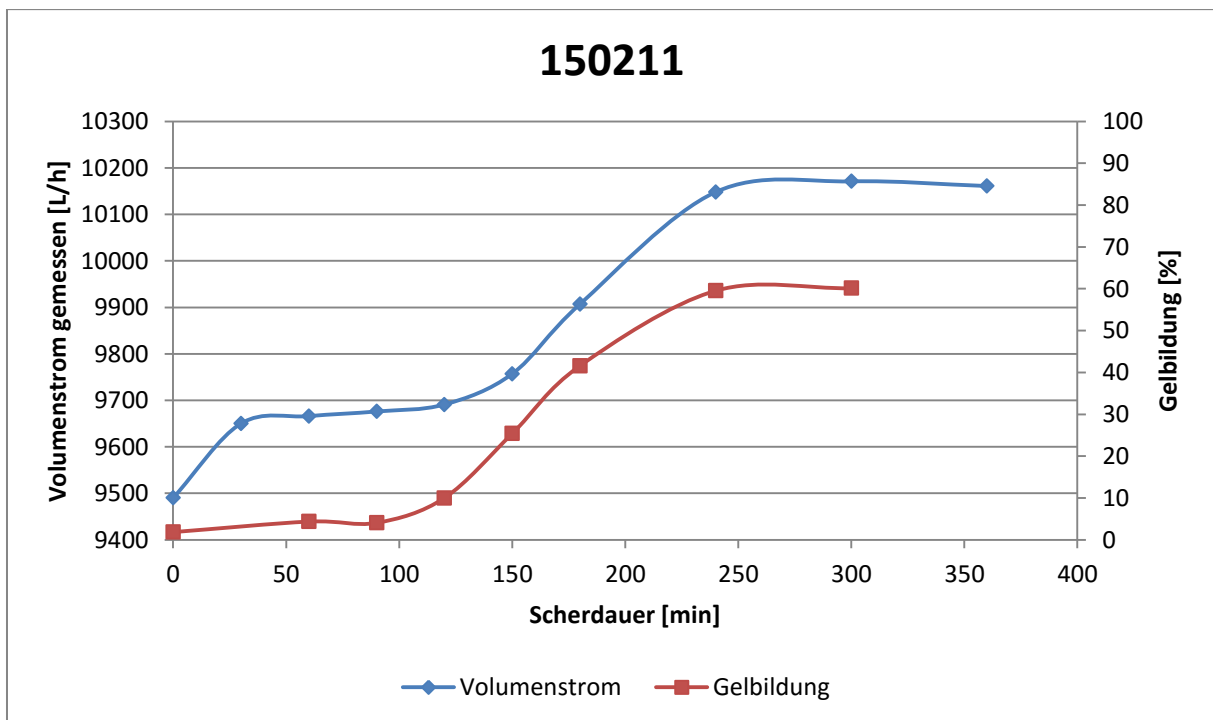


Abbildung 40: Volumenstrom und Gelbildung – normalsaugende Kreiselpumpe A, nominaler Betriebspunkt,  $\beta$ -Glucan-Charge #A02