

Abbildung 2.2: (a) Fließkurven- und (b) Viskositätsverläufe der Fließklassen innerhalb des Herschel-Bulkley-Modells entsprechend Tabelle 2.1 in linearer Darstellung

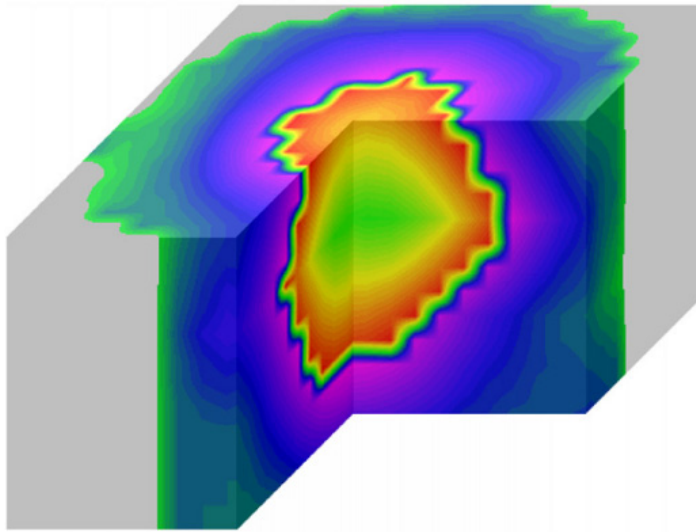


Abbildung 2.4: 3D-Kavernendarstellung durch ERT, rekonstruiert aus tomographischen 2D-Schnitten, Xanthan 0,5% [Pakzad 2008b]

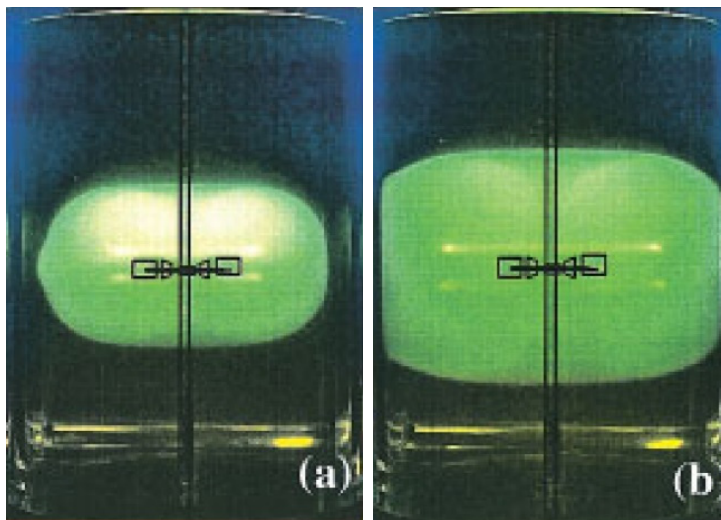


Abbildung 2.6: Tracervisualisierung durch UV-Fluoreszenz
Carbopol-Lösung im Rührbehälter mit Rushton-Impeller bei (a) $Re=35,1$ (300 min^{-1}) und (b) $Re=90,2$ (500 min^{-1}) [Arratia 2006]

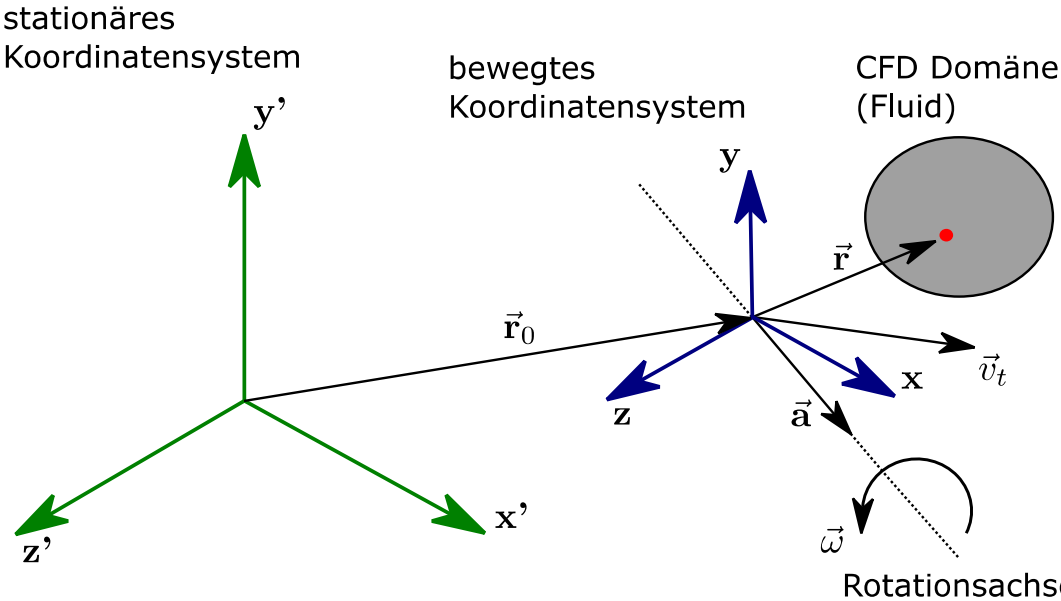


Abbildung 2.9: Koordinatensysteme des stationären und des bewegten Bezugssystems nach [ANSYS 2013a, S. 19]

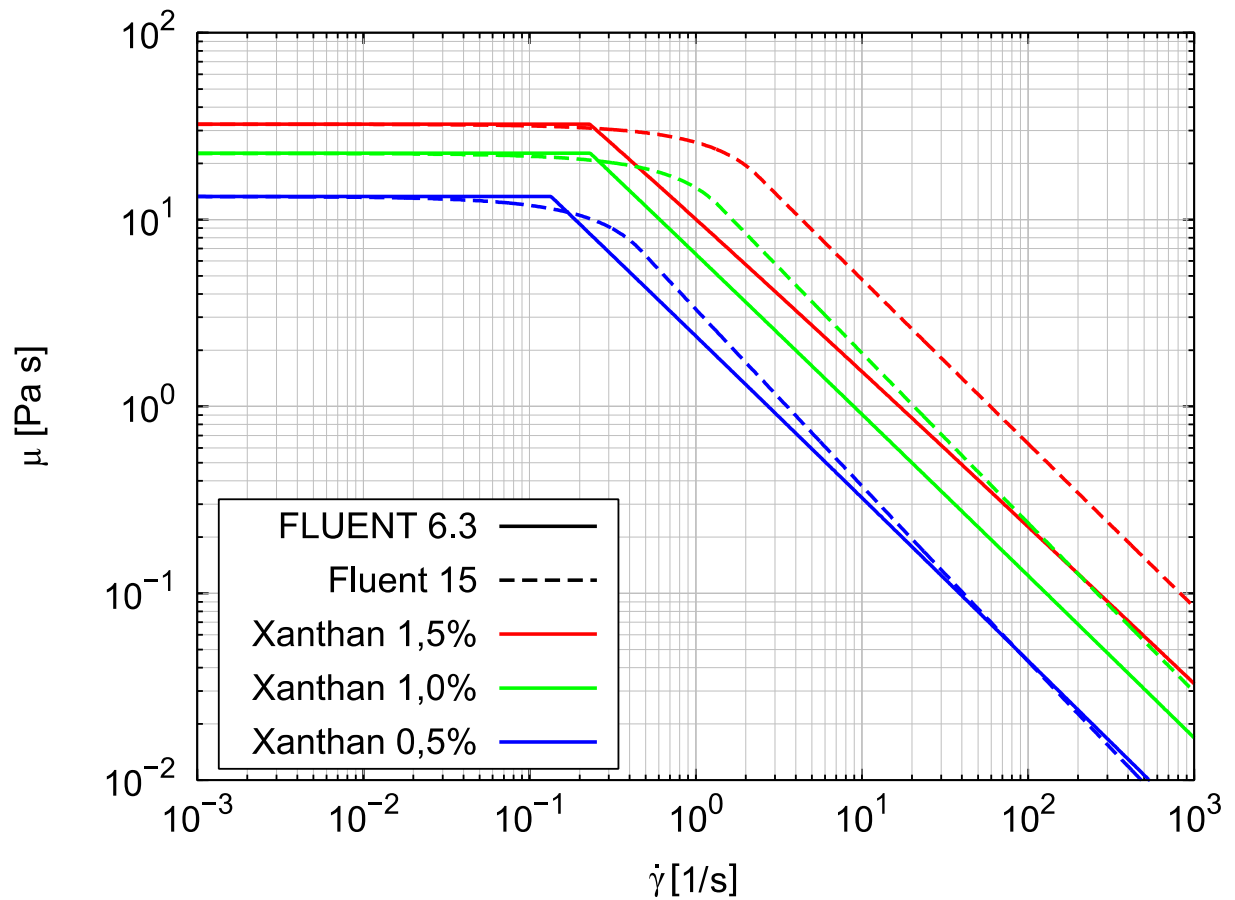


Abbildung 3.1: Vergleich der Viskositätsmodelle in FLUENT 6.3 und 15 für verschiedene Xanthankonzentrationen

Durchgezogene Kurven: Viskositätsmodell FLUENT 6.3 (entspricht der genutzten UDF), Gestrichelte Kurven: Viskositätsmodell Fluent 15, jeweils experimentelle Grenzviskosität

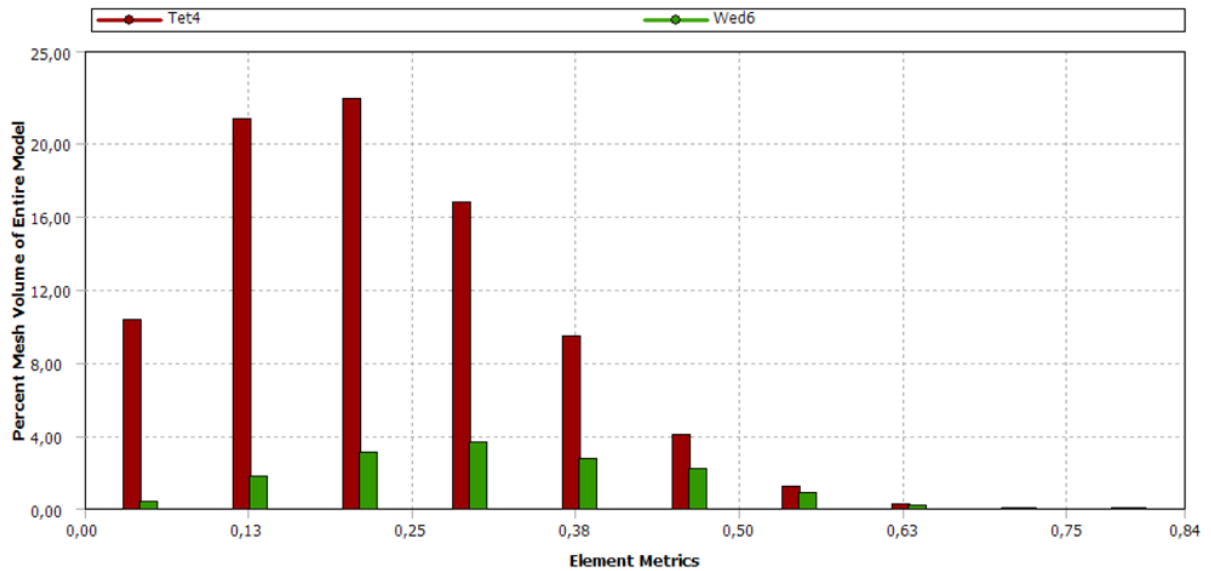


Abbildung 4.3: Bewertung der Qualität des numerischen Rechengitters anhand der Verzerrtheit von Gitterzellen

Primäre Verwendung von Tetraederzellen (rot), geringerer Anteil an prismatischen Gitterzellen im Rechengitter (grün)

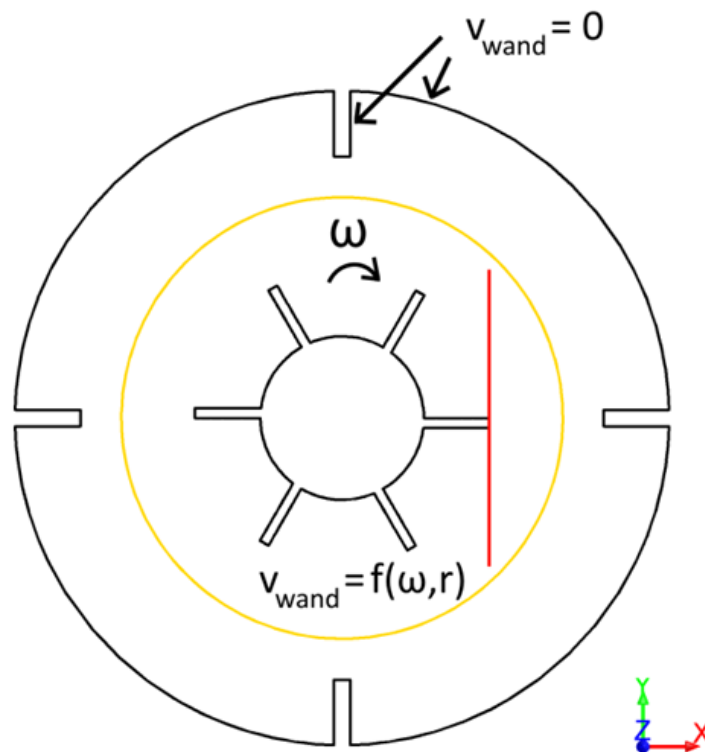


Abbildung 4.4: Darstellung der Randbedingungen des Rotationsmodells und Lage der Messlinie zur Auswertung der Geschwindigkeitsprofile der Rechengitterstudie
Schnitt auf Rührermittalebene, Geschwindigkeitsangaben im stationären Bezugssystem, schwarz: Rührbehälter/Stromstörer/Rühreroberfläche, gelb: Interface, rot: Messlinie auf Rührermittalebene ($x = 0,09\text{m}$ $y = -0,09\dots 0,09\text{m}$ $z = 0,21\text{m}$)

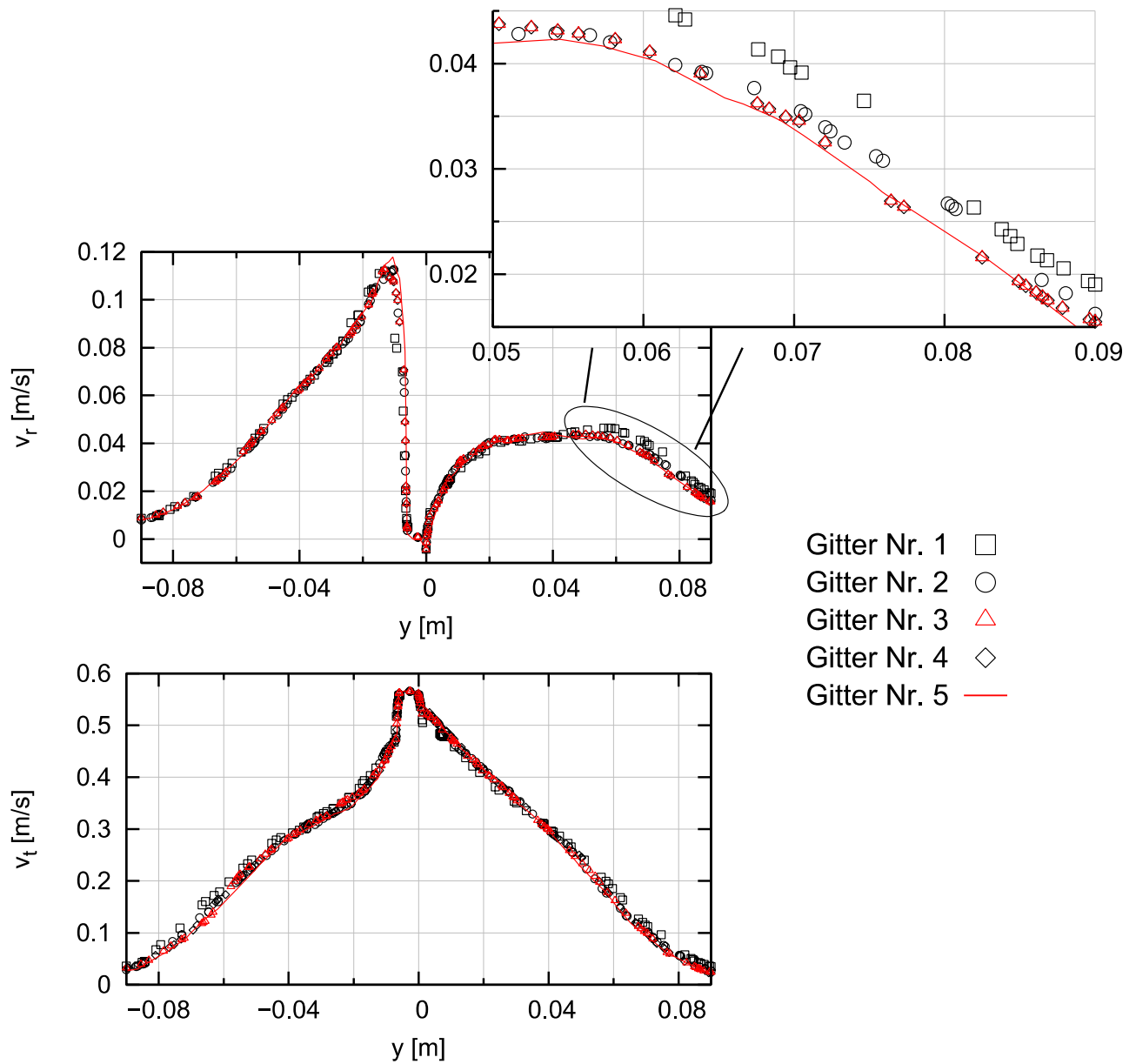


Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsprofile der Gitterunabhängigkeitsstudie zum Rührer Scaba 6SRGT in radialer und tangentialer Richtung

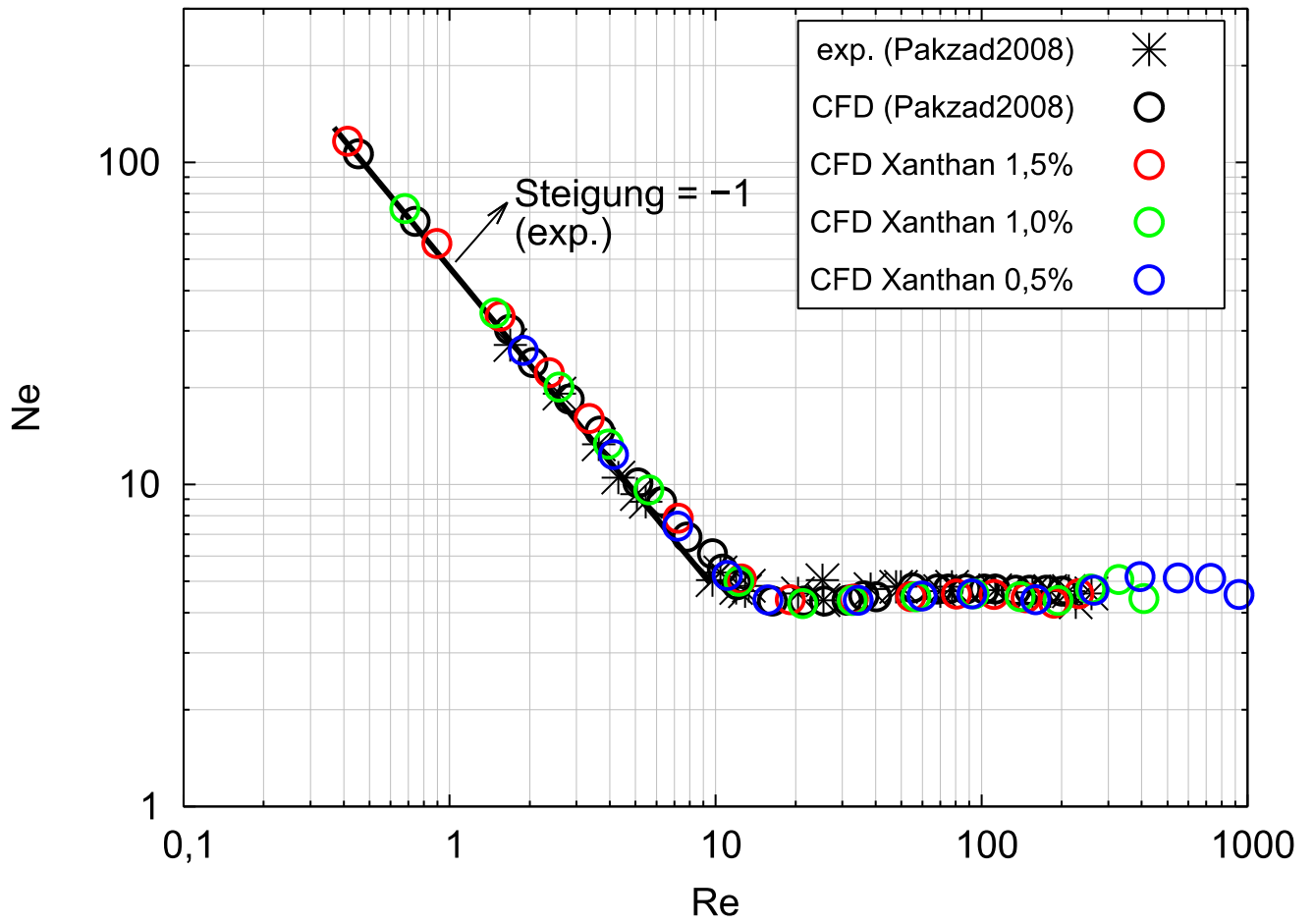


Abbildung 4.6: Leistungscharakteristik Scaba 6SRGT für verschiedene Xanthankonzentrationen

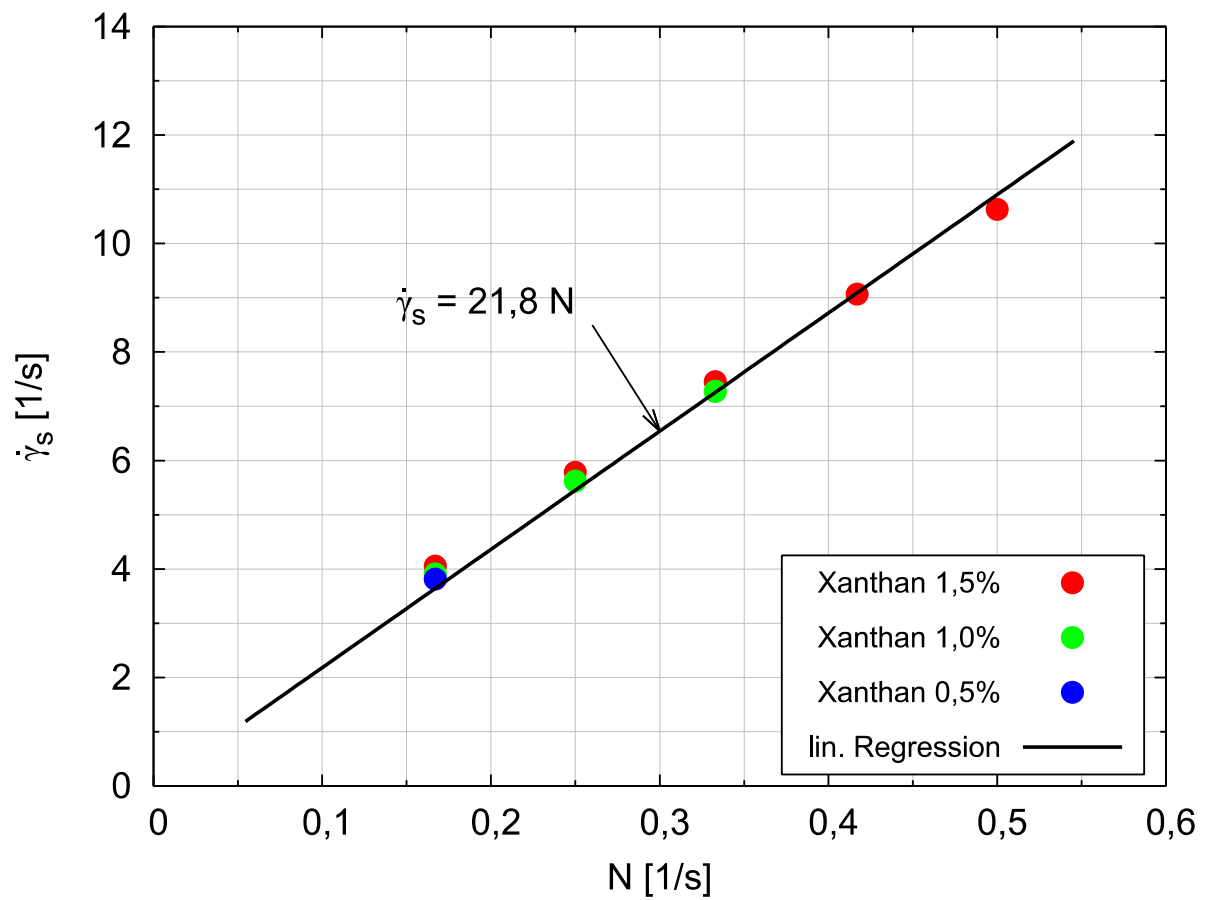


Abbildung 4.7: Bestimmung der Metzner-Otto-Konstanten für die untersuchten Xanthanlösungen
 Bei geringeren Konzentrationen entsprechen weniger Newton-Zahlen dem laminaren Bereich der Newton'schen Leistungscharakteristik

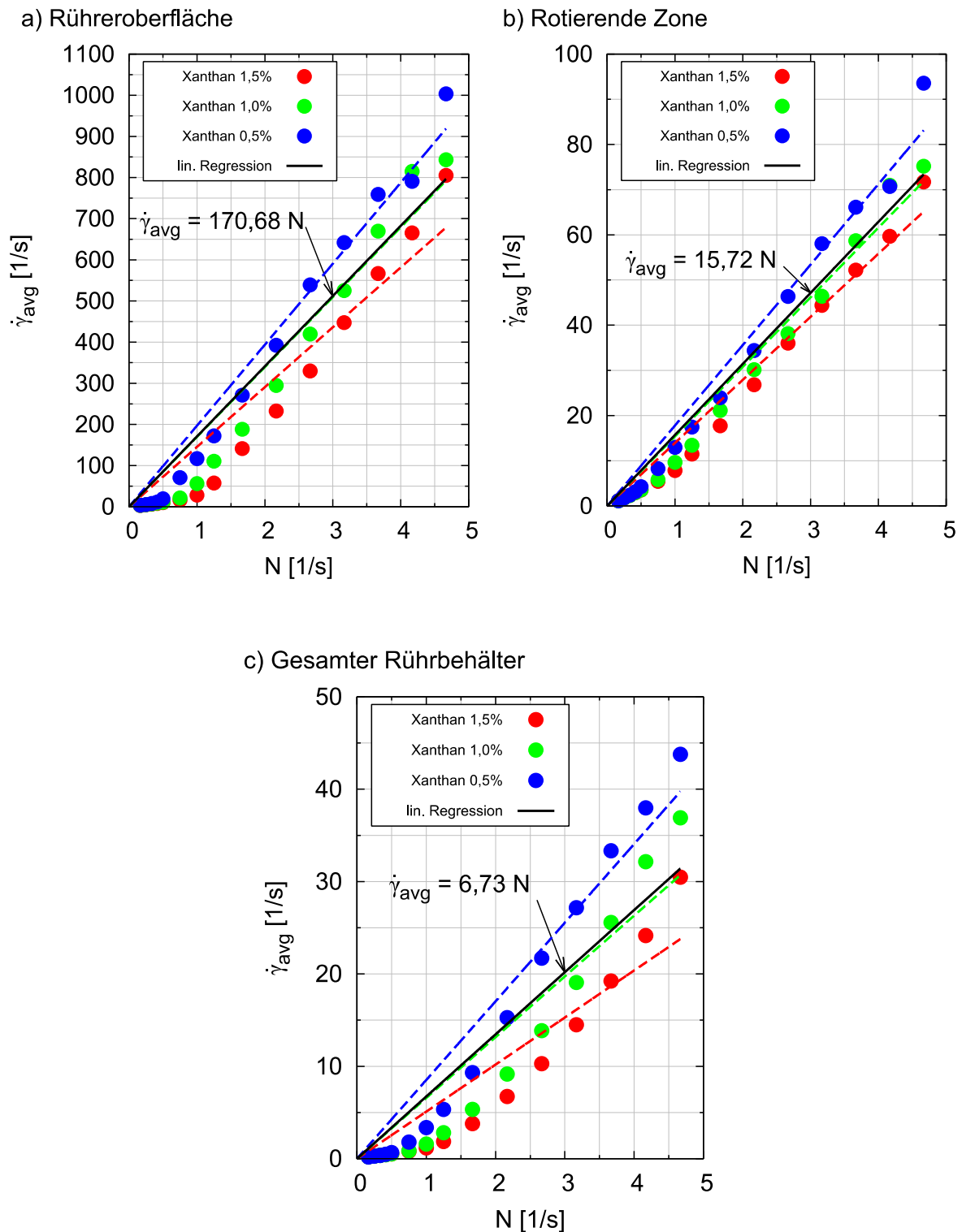


Abbildung 4.8: Abhängigkeit der Metzner-Otto-Konstanten vom gewählten Auswertebereich der gemittelten Scherrate durch CFD

Auswertung der gemittelten Scherrate (a) an der Rühreroberfläche, (b) in der rotierenden Zone und (c) im gesamten Rührbehälter, Regression der einzelnen Konzentrationen gestrichelt in unterschiedlicher Farbe, Regression über alle Konzentrationen als schwarze Gerade, rotierende Zone hier mit einem Durchmesser von 0,27m und einer Höhe von 0,115m (int-2-1, vgl. Abschnitt 4.14)

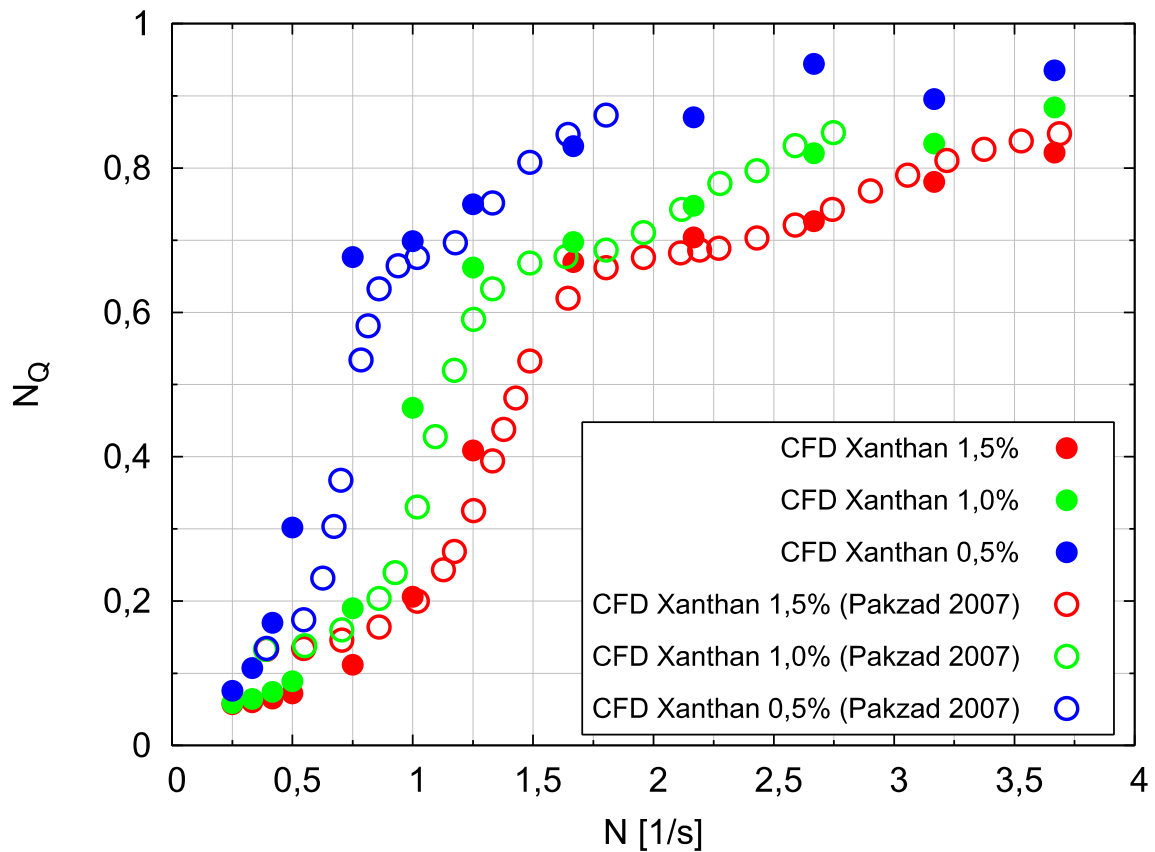


Abbildung 4.9: Vergleich der Förderkennzahl verschiedener Xanthankonzentrationen eigener CFD-Simulationen mit Simulationen aus [Pakzad 2007]

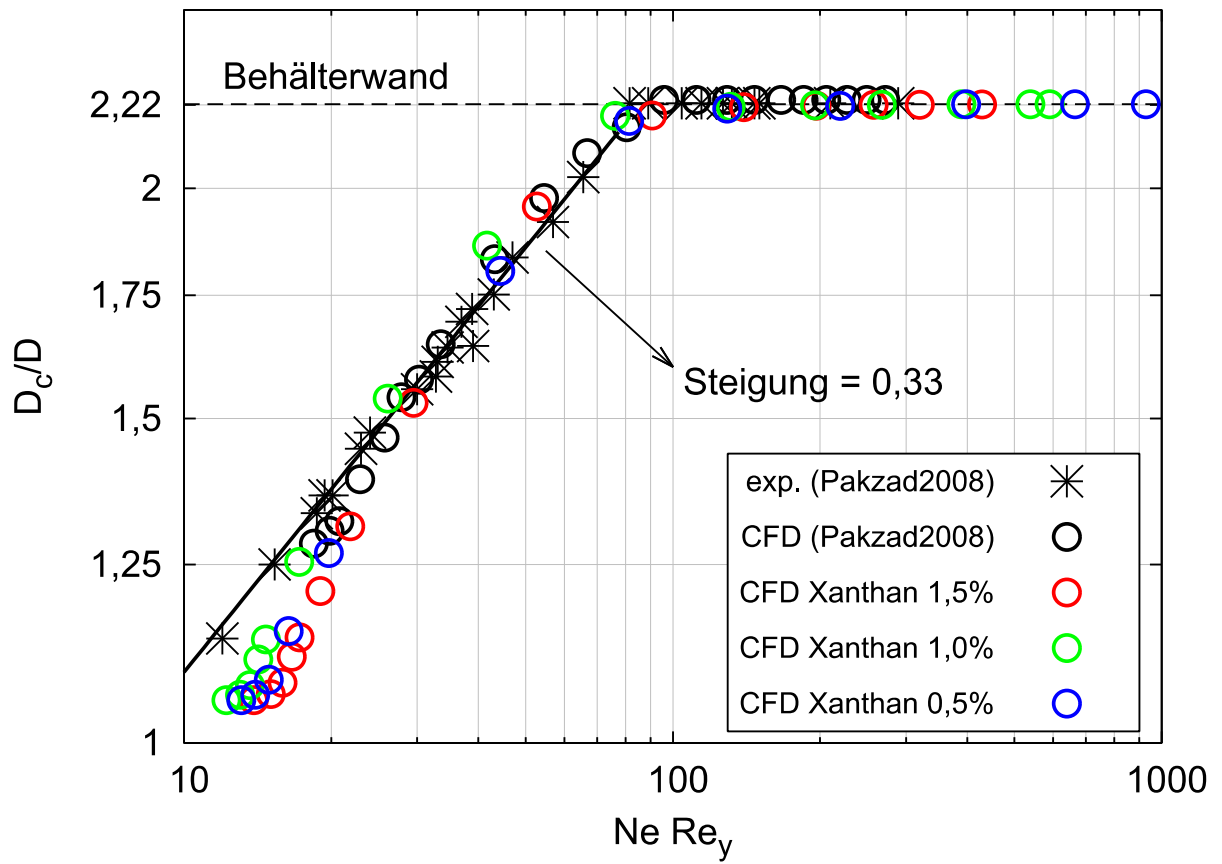
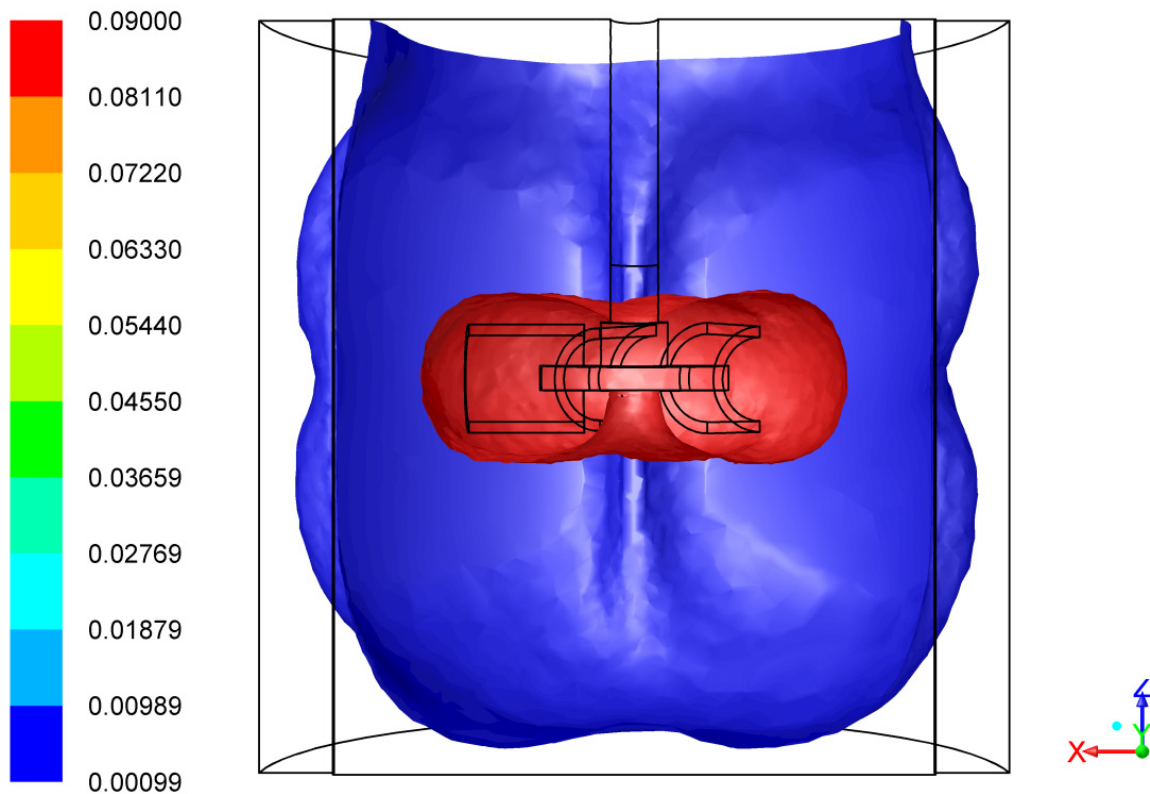


Abbildung 4.11: Dimensionsloser Kavernendurchmesser in Abhängigkeit vom Leistungseintrag und Reynolds-Zahl der Fließgrenzspannung
 Darstellung der Daten aus [Pakzad 2008b] unabhängig von der jeweiligen Konzentration



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, lam)

Abbildung 4.12: Kavernenform in Abhängigkeit der Kavernengrenzgeschwindigkeit
Kavernengrenzen für die Grenzgeschwindigkeiten $v_c = 0,09\text{m/s}$ (rot) und
 $v_c = 0,00099\text{ m/s}$ (blau) für Xanthan 1,5% bei 60 min^{-1} ($Re = 12,5$), Ansicht eingegrenzt auf
Koordinaten $y < 0$

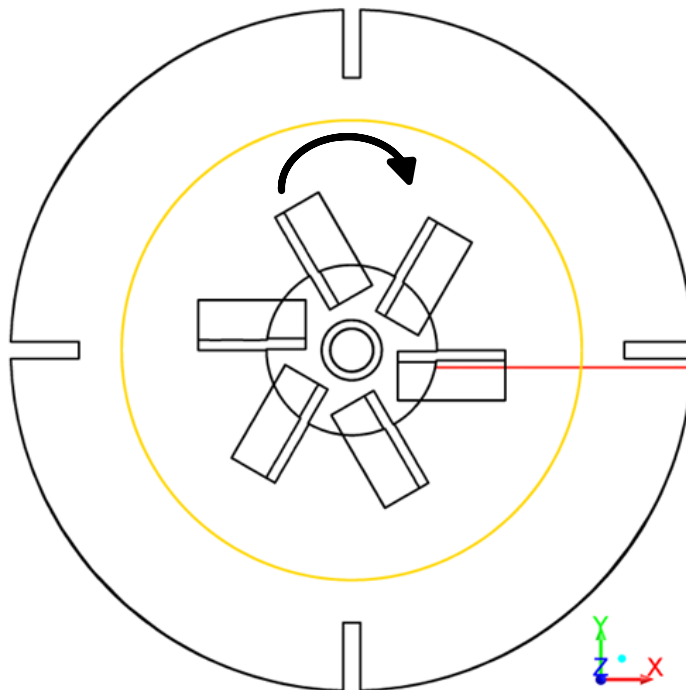


Abbildung 4.13: Darstellung der Messlinie zur Auswertung der Geschwindigkeits- und Scherratenprofile

Rührbehälter in orthogonaler Parallelprojektion
schwarz: Rührbehälter/Rührblätter/Rührerwelle,
gelb: Interface, rot: Messlinie auf Rührermittel-
ebene ($x = 0,05 \dots 0,2\text{m}$ $y = -0,01\text{m}$ $z = 0,21\text{m}$)

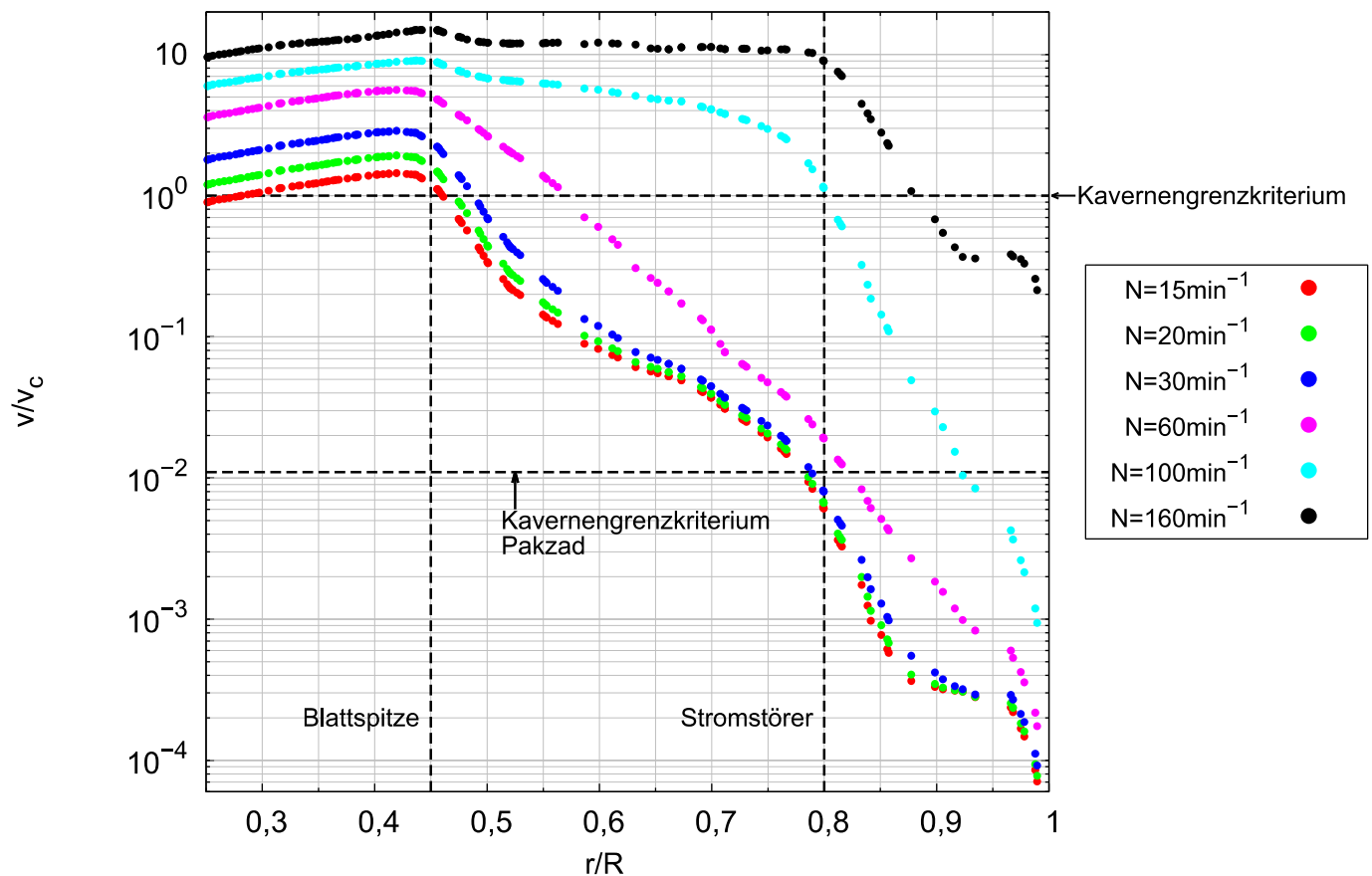


Abbildung 4.14: Simulative Geschwindigkeitsprofile bezogen auf die Kavernengrenzgeschwindigkeit für Xanthan 1,5% bei ausgewählten Rührerdrehzahlen
 Auswertung auf der in Abbildung 4.13 abgebildeten Messlinie, Markierung des verwendeten Kavernengrenzkriteriums im Vergleich zu Pakzad [Pakzad 2007], Projektion der radialen Positionen der Rührerblattspitze und des Stromstörers

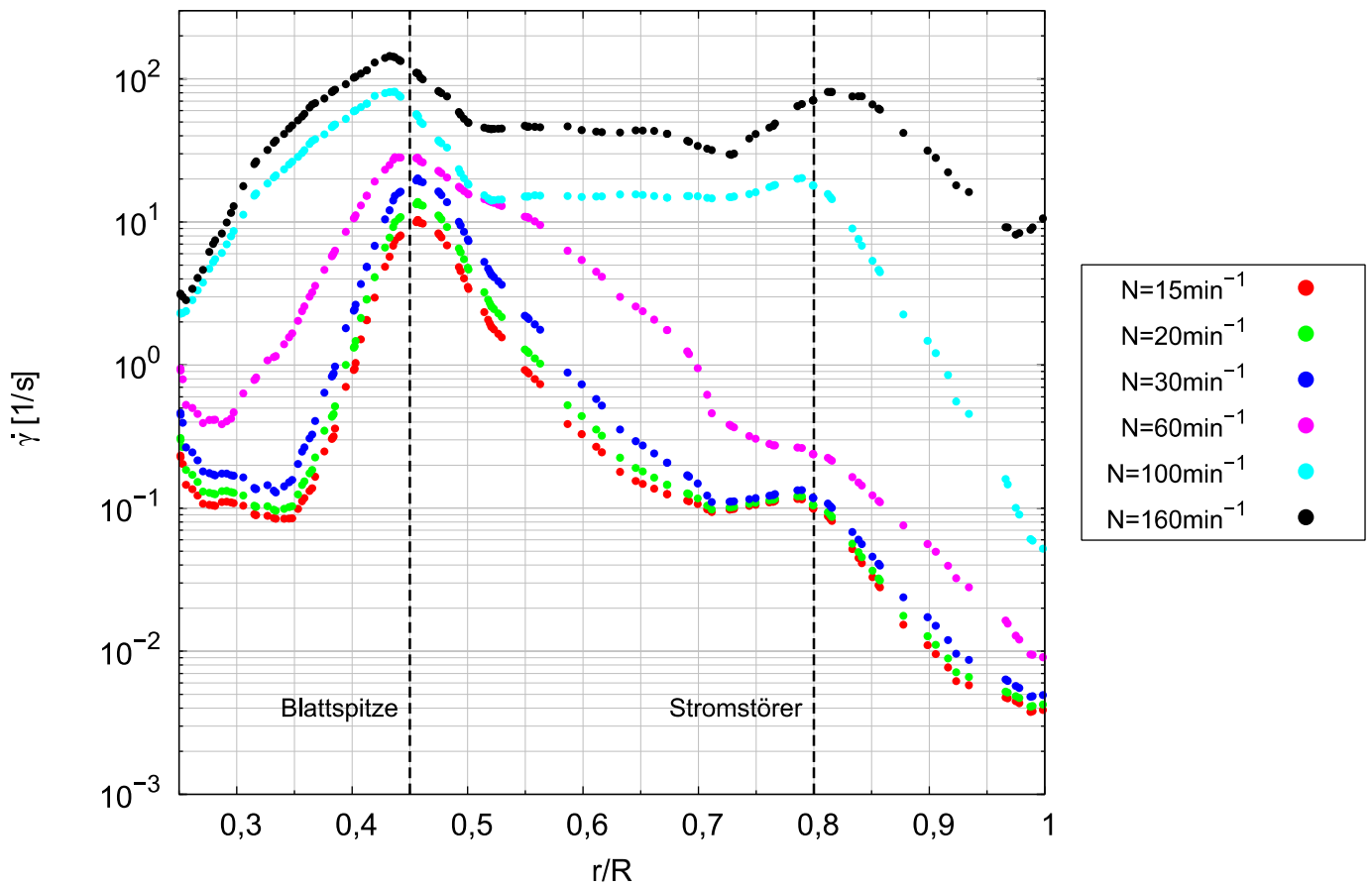


Abbildung 4.15: Simulative Scherratenprofile für Xanthan 1,5% bei ausgewählten Rührerdrehzahlen
 Auswertung auf der in Abbildung 4.13 abgebildeten Messlinie, Projektion der radialen Positionen
 der Rührerblattspitze und des Stromstörers

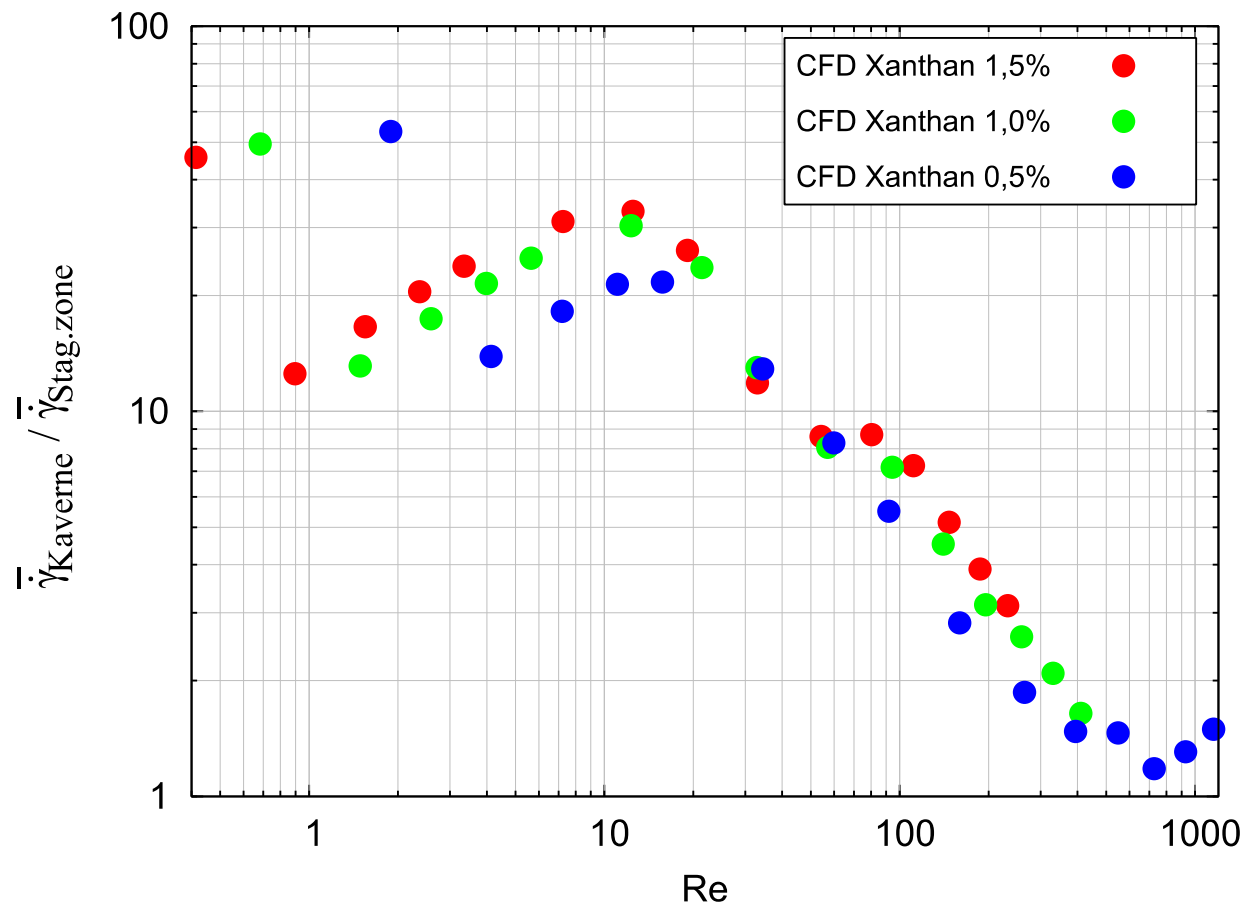


Abbildung 4.16: Volumengemittelte Scherrate innerhalb der Kaverne bezogen auf die volumengemittelte Scherrate außerhalb der Kaverne in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl
Maximalwerte bei den jeweils geringsten Reynolds-Zahlen numerisch bedingt, siehe Erklärung im Text

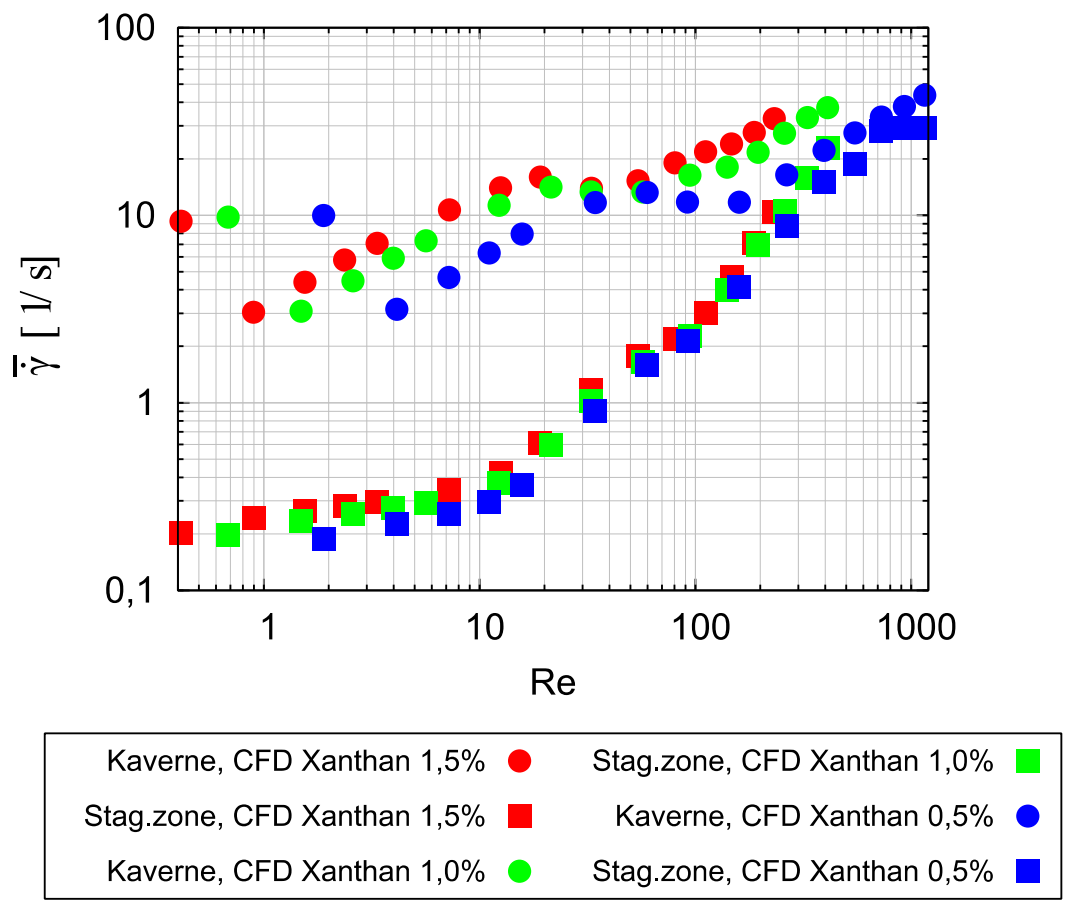


Abbildung 4.17: Volumengemittelte Scherrate innerhalb der Kaverne und der Stagnationszone in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl für alle untersuchten Xanthankonzentrationen

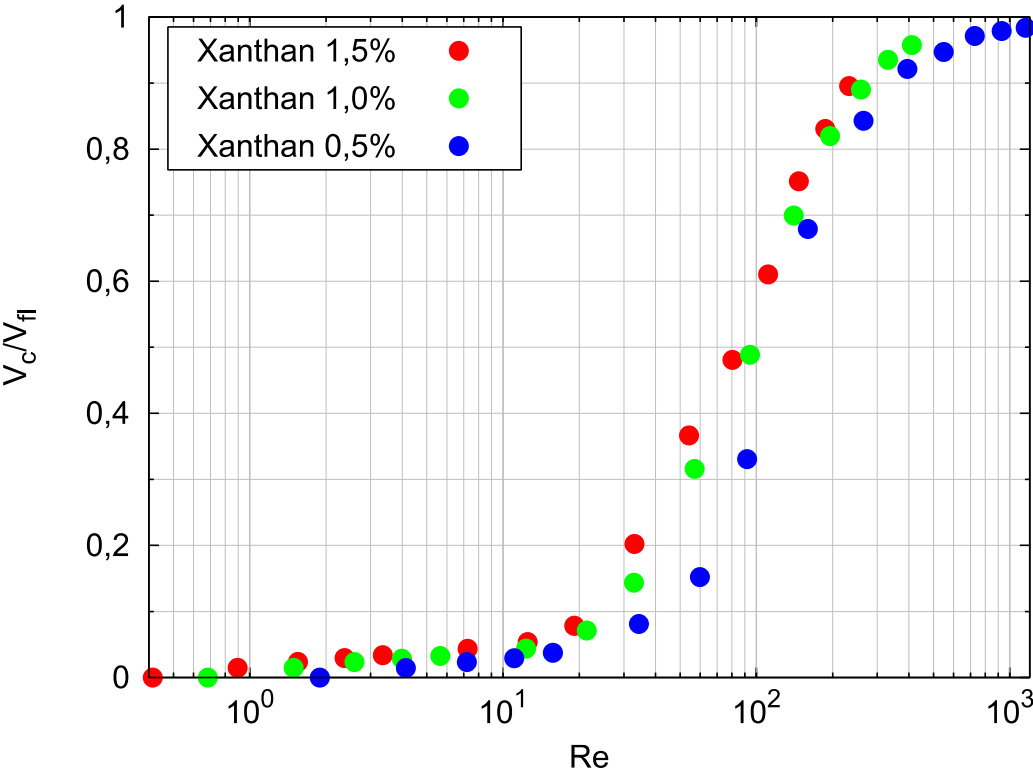
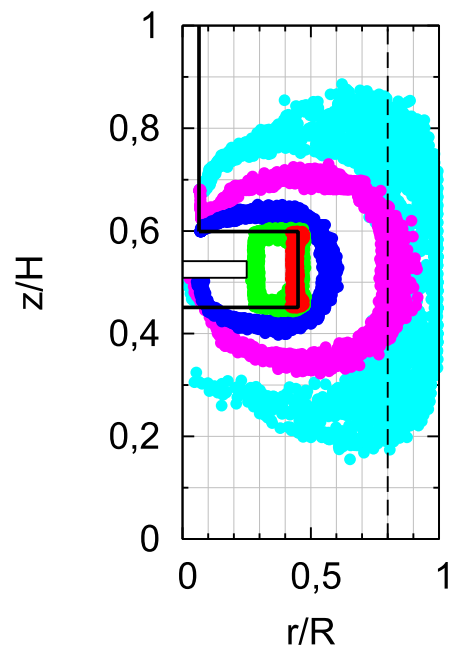


Abbildung 4.18: Volumenanteil der Kaverne bezogen auf gesamtes Flüssigkeitsvolumen im Rührbehälter in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl für alle untersuchten Konzentrationen



Rührer/Welle	—	60 min ⁻¹ (Re=13)	●
Stromstörer	- - - - -	100 min ⁻¹ (Re=33)	●
10 min ⁻¹ (Re=0,4)	●	160 min ⁻¹ (Re=80)	●
15 min ⁻¹ (Re=0,9)	●		

Abbildung 4.19: Projizierte Kavernenform in Abhängigkeit ausgewählter Rührerdrehzahlen für Xanthan 1,5%

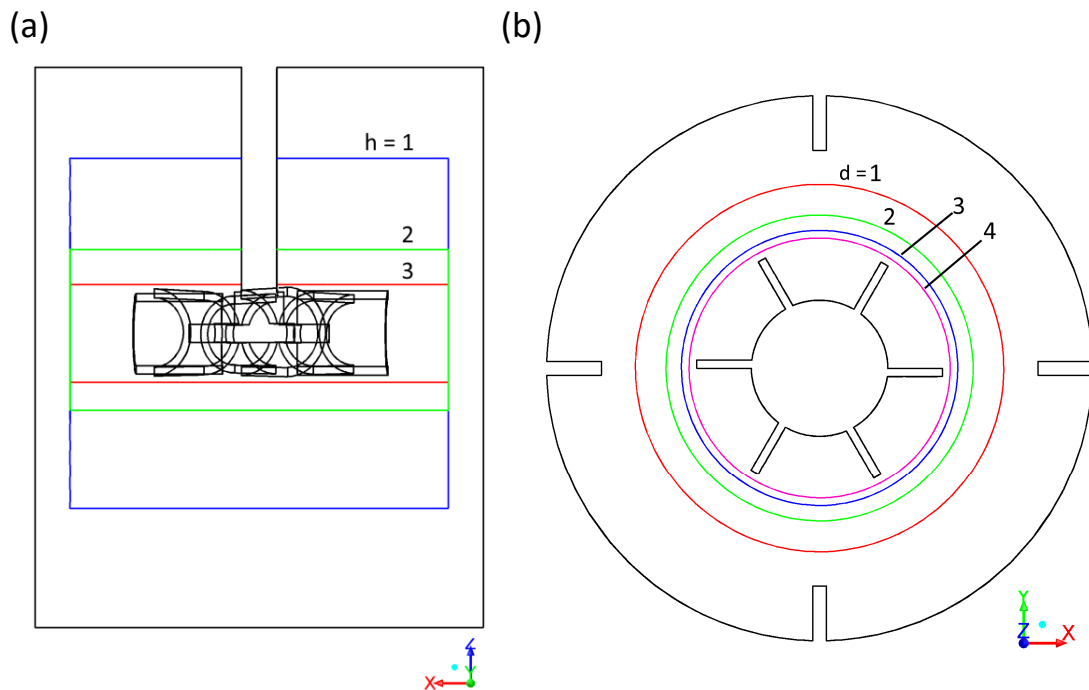
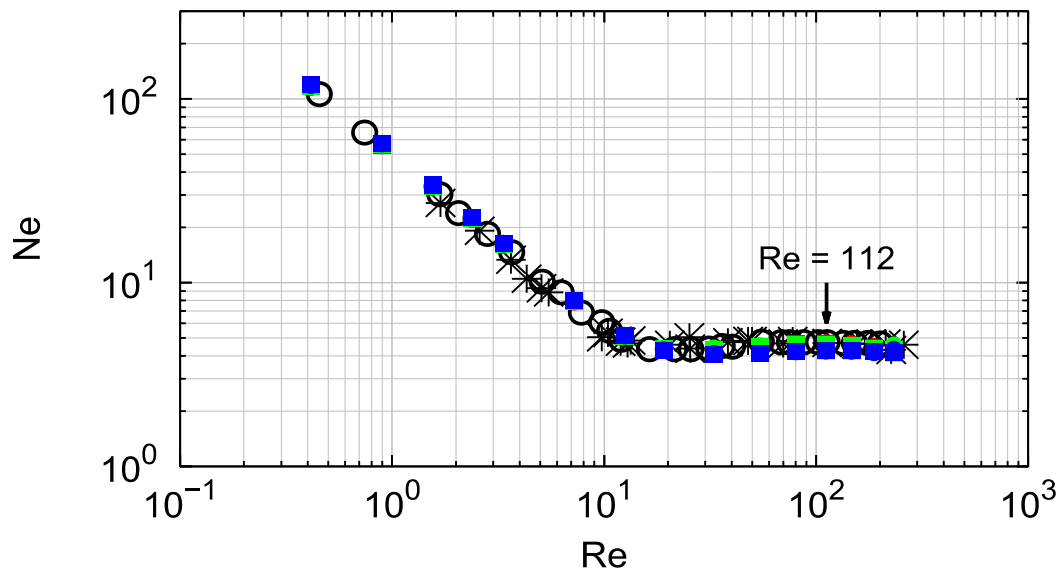


Abbildung 4.20: Darstellung der untersuchten Lagen des Interfaces
Lage der Interfacefläche in (a) Höhe h und im (b) Durchmesser d variiert, (a) Schnitt $y = 0$ mit Darstellung aller Rührerblätter, (b) Schnitt Rührermittelsebene $z = 0,21$ m,
Nachfolgend genutzte Bezeichnung der Interfaces: int-h-d

Tabelle 4.4: Abweichung der Newton-Zahl für Xanthan 1,5% und $Re = 112$ in den untersuchten Interfacelagen im Vergleich zur experimentellen Leistungscharakteristik [Pakzad 2007].

Kennzeichnung geringer relativer Abweichung (grün) und hoher relativer Abweichung (rot) zu experimentellem Wert

Interfacedurchmesser [m]		Interfacehöhe [m]		
		int-1-d 0,250	int-2-d 0,115	int-3-d 0,080
int-h-1	0,270	0,49%	-3,00%	-9,76%
int-h-2	0,215	-1,08%	-2,21%	-9,67%
int-h-3	0,2025	-6,71%	-7,74%	-14,01%
int-h-4	0,19125	Keine Lösung möglich		



exp. (Pakzad2008)	✱	int-1-3	▲	int-3-1	●
CFD (Pakzad2008)	○	int-2-1	●	int-3-2	■
int-1-1	●	int-2-2	■	int-3-3	▲
int-1-2	■	int-2-3	▲		

Abbildung 4.21: Nicht-Newton'sche Leistungscharakteristik für die unterschiedlichen Interfacelagen. Bezeichnung der Interfaces entsprechend Abbildung 4.20, Pfeil markiert die Stelle $Re = 112$ für die Auswertung in Tabelle 4.4

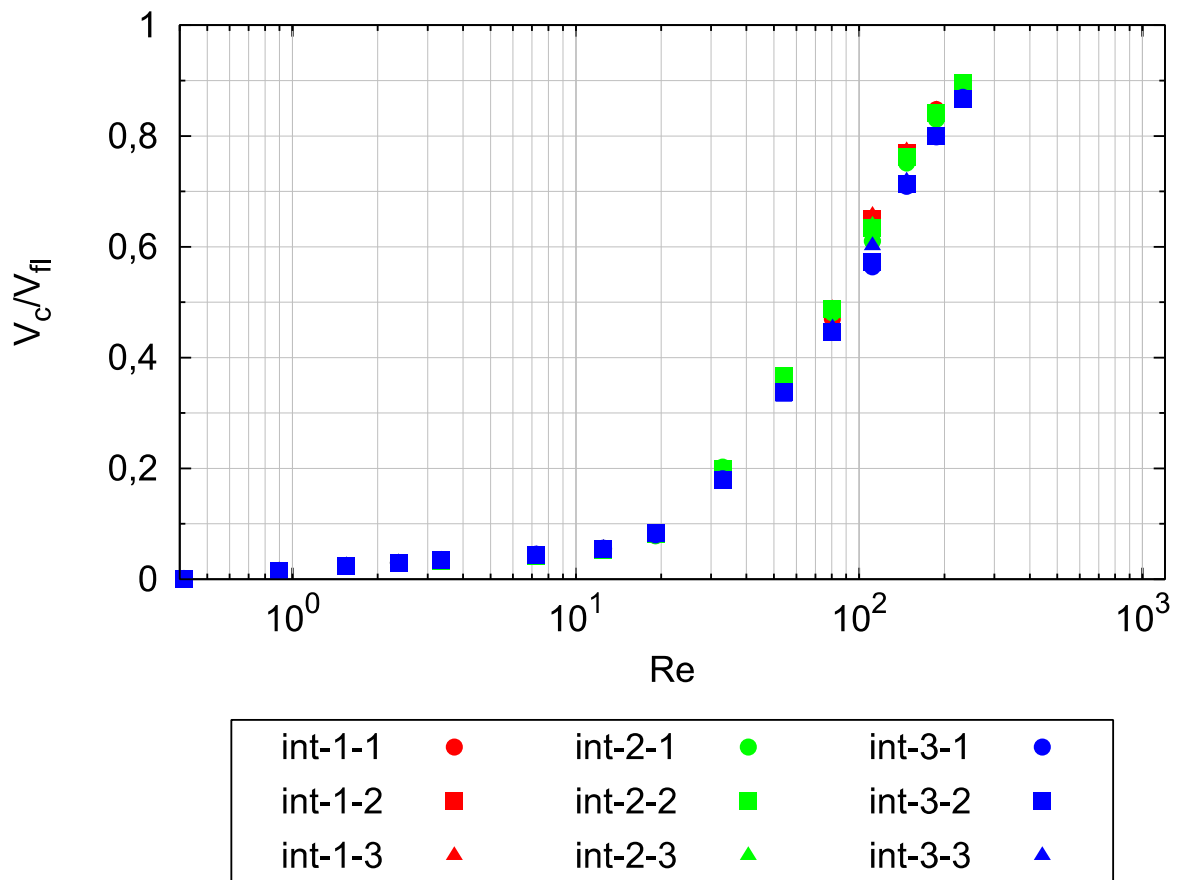


Abbildung 4.22: Spezifisches Kavernenvolumen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für die verschiedenen Interfacelagen, Xanthan 1,5%
 Bezeichnung der Interfaces entsprechend Abbildung 4.20

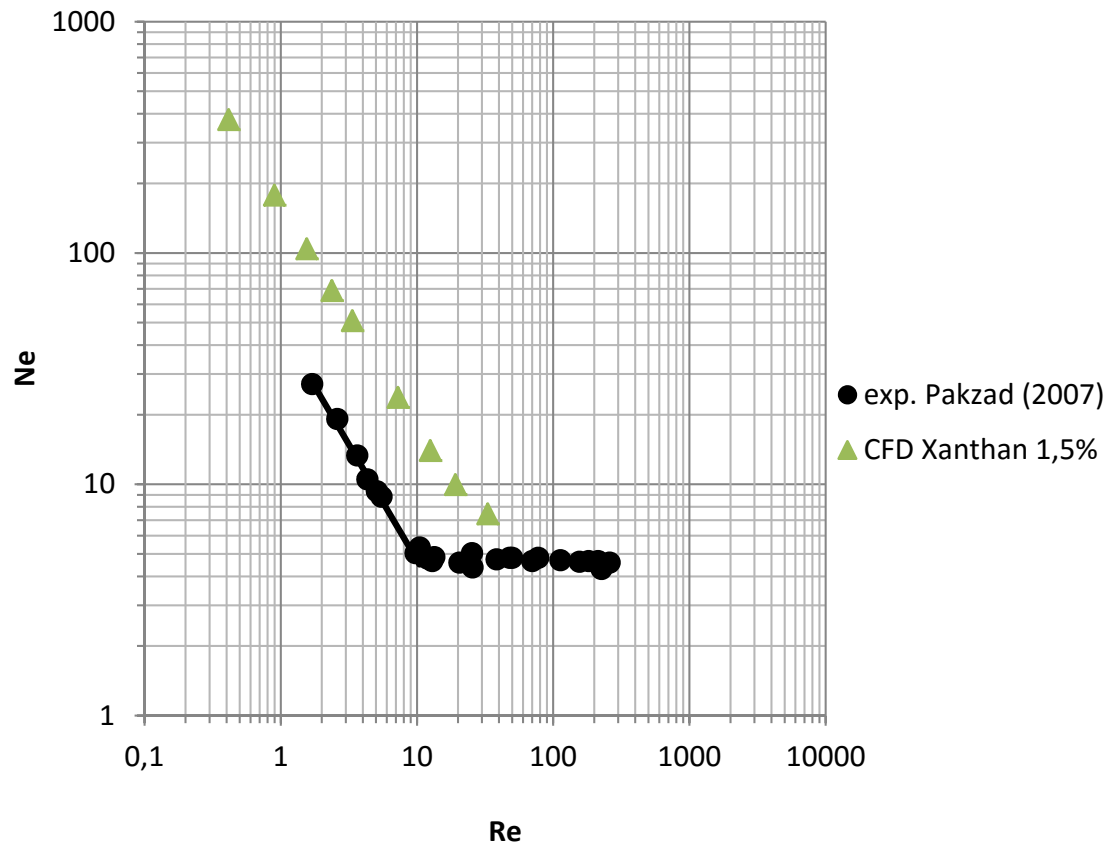


Abbildung Anhang A.3: Abweichende Leistungscharakteristik durch stetiges Viskositätsmodell in Fluent 15 unter Berücksichtigung der experimentellen Grenzviskosität

A.4 UDF für die Viskositätsmodellierung nach FLUENT 6.3

```

/*****
/***** UDF zur Modellierung der Viskosität entsprechend FLUENT 6.3 *****/
/*****

/*
mu = mu0; ; y_dot < tau0/mu0
mu = [tau0 + k*(y_dot^n - (tau0/mu0)^n)]/y_dot ; y_dot > tau0/mu0
*/

#include "udf.h"

/*****/
/**** Xanthan 1,5%****/
/*****/
DEFINE_PROPERTY(my_HB_Xanthan15,c,t)
{
real mu,mu0,k,n,tau0,y_dot,y_crit;

/* H-B Modellparameter */
tau0 = 7.455;
k = 14.0;
n = 0.14;
mu0 = 32.36;

/* Scherrate */
y_dot = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
y_crit = MAX(tau0, 1.0E-10) / MAX(mu0, 1.0E-10);

/* H-B Modellgleichung */
if (y_dot <= y_crit)
{
mu = mu0;
}
else
{
mu = (tau0 + k*(pow(y_dot, n) - pow(y_crit, n)))/y_dot;
}
return mu;
}

/*****/
/**** Xanthan 1,0%****/
/*****/
DEFINE_PROPERTY(my_HB_Xanthan10,c,t)
{
real mu,mu0,k,n,tau0,y_dot,y_crit;

/* H-B Modellparameter */

```

```
tau0 = 5.254;
k     = 8.0;
n     = 0.12;
mu0   = 22.61;

/* Scherrate */
y_dot = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
y_crit = MAX(tau0, 1.0E-10) / MAX(mu0, 1.0E-10);

/* H-B Modellgleichung */
if (y_dot <= y_crit)
{
    mu = mu0;
}
else
{
    mu = (tau0 + k*(pow(y_dot, n) - pow(y_crit, n)))/y_dot;
}
return mu;
}

/*****
*** Xanthan 0,5%***
*****/
DEFINE_PROPERTY(my_HB_Xanthan05,c,t)
{
    real mu,mu0,k,n,tau0,y_dot,y_crit;

/* H-B Modellparameter */
tau0 = 1.789;
k     = 3.0;
n     = 0.11;
mu0   = 13.30;

/* Scherrate */
y_dot = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
y_crit = MAX(tau0, 1.0E-10) / MAX(mu0, 1.0E-10);

/* H-B Modellgleichung */
if (y_dot <= y_crit)
{
    mu = mu0;
}
else
{
    mu = (tau0 + k*(pow(y_dot, n) - pow(y_crit, n)))/y_dot;
}
return mu;
}
```

A.5 Bash-Skript zur Auswertung der Simulationen

```
#!/bin/bash

## Definiere Funktionen zur Auswertung
kavernendurchmesser () {
    echo "#Kavernendurchmesser fuer die gewaehlten Drehzahlen nach Ge-
    schwindigkeitskriterium utan=0.01utip" > Dc.dat
    echo -e "#w [rad/s] \tDc [m]" >> Dc.dat
    for i in ${w[@]}; do
        awk -v i=$i 'END{print i "\t" 2 * $2 >> "Dc.dat"}' <
        w=${i}_Dc_max_umag=0.09.dat;
    done
}

foerderstrom () {
    echo "#Foerdervolumenstrom Qr bei den gewaehlten Drehzahlen" >
    Qr.dat
    echo -e "#w [rad/s] \tQr [m**3/s]" >> Qr.dat
    for i in ${w[@]}; do
        awk -v i=$i 'END{print i "\t" $2 >> "Qr.dat"}' <
        w=${i}_Qr.dat;
    done
}

moment () {
    echo "#Moment M auf den Waenden der rotierenden Teile bei den ge-
    waehlten Drehzahlen" > M.dat
    echo -e "#w [rad/s] \tM [Nm]" >> M.dat
    for i in ${w[@]}; do
        awk -v i=$i 'END{print i "\t" $4 >> "M.dat"}' <
        w=${i}_moment_rot.dat;
    done
}

scherrate() {
    echo "#Flächengemittelte Scherraten auf den Rührblättern für die
    gewählten Drehzahlen" > y.-blatt.dat
    echo -e "#n [1/s] \ty.-blatt. [1/s]" >> y.-blatt.dat
    j=0
    for i in ${w[@]}; do
        awk -v i=$i -v n=${n[j]} 'END{print n "\t" $2 >> "y.-
        blatt.dat"}' < w=${i}_strain_avg_blatt.dat;
        ((j=j+1))
    done
}

kavernenvolumen() {
    echo "#Volumen der Kaverne nach Kavernenkriterium u=0.09 m/s" >
    Vc.dat
    echo -e "#n [1/s] \tw[rad/s] \tKavernenvolumen [m**3]" >> Vc.dat
    j=0
    for i in ${w[@]}; do
        awk -v i=$i -v n=${n[j]} 'END{print n "\t" i "\t" $2 >>
        "Vc.dat"}' < w=${i}_Vc_umag=0.09.dat;
        ((j=j+1))
    done
}
}
```

```
## Definiere die gewaehlten Drehzahlen
w=(1.047 1.571 2.094 2.618 3.142 4.712 6.283 7.854 10.472 13.614 16.755
19.897 23.038 26.180 29.322) #rad/s

n=(0.1667 0.2500 0.3333 0.4167 0.5000 0.7500 1.0000 1.2500 1.6667 2.1667
2.6667 3.1667 3.6667 4.1667 4.6667) #1/s

## Fuehre die Auswertung fuer die gewaehlten Drehzahlen durch
for ordner in *; do
    if [ -d $ordner ]; then
        cd $ordner/
        moment
        kavernendurchmesser
        kavernenvolumen
        foerderstrom
        scherrate
        sed 's/\./,/g' M.dat > M,.dat
        sed 's/\./,/g' Dc.dat > Dc,.dat
        sed 's/\./,/g' Vc.dat > Vc,.dat
        sed 's/\./,/g' Qr.dat > Qr,.dat
        sed 's/\./,/g' y.-blatt.dat > y,-blatt.dat
        cd ../
    fi
done
```

A.6 Numerisches Rechengitter auf Rührermittlebene

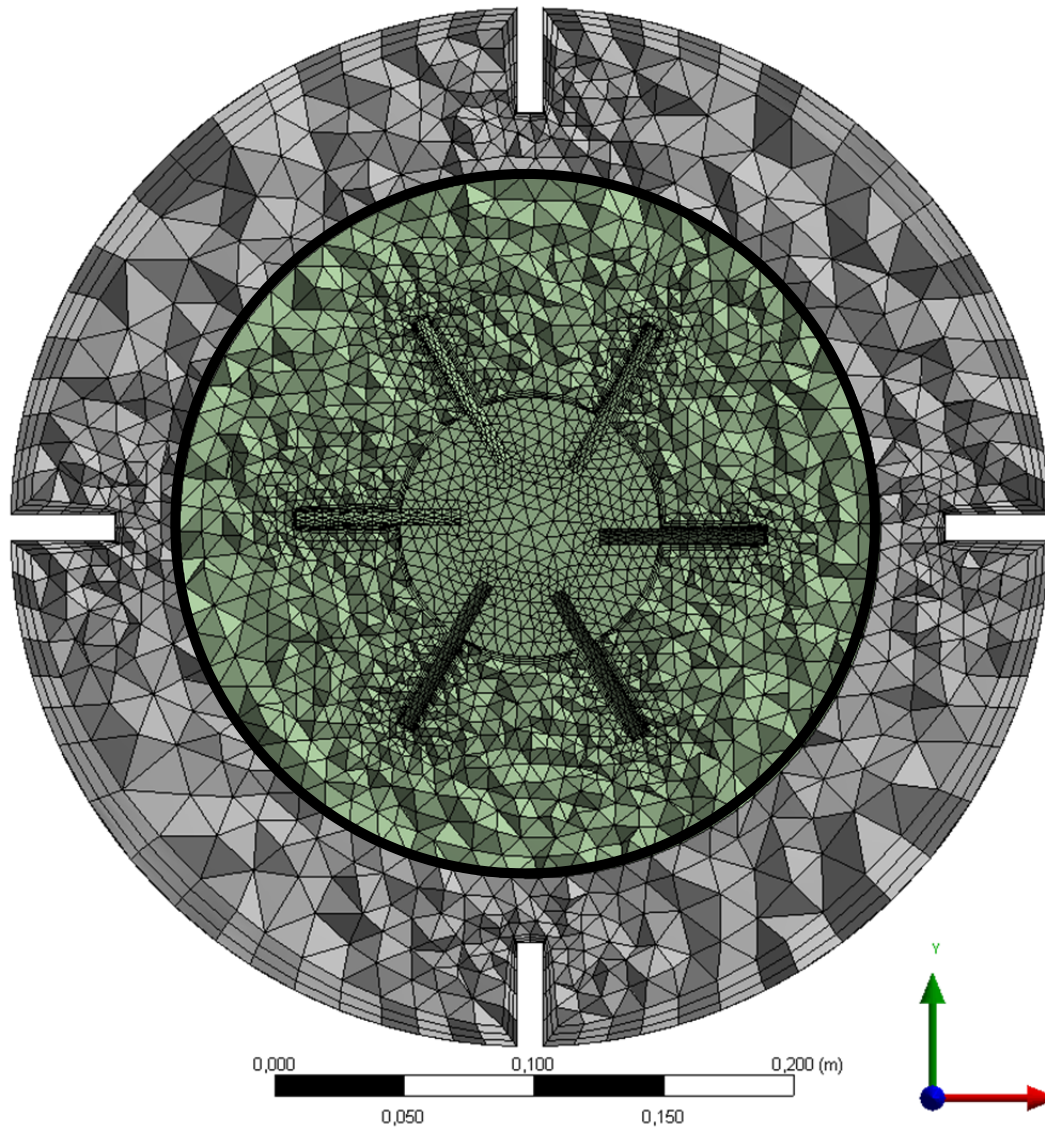
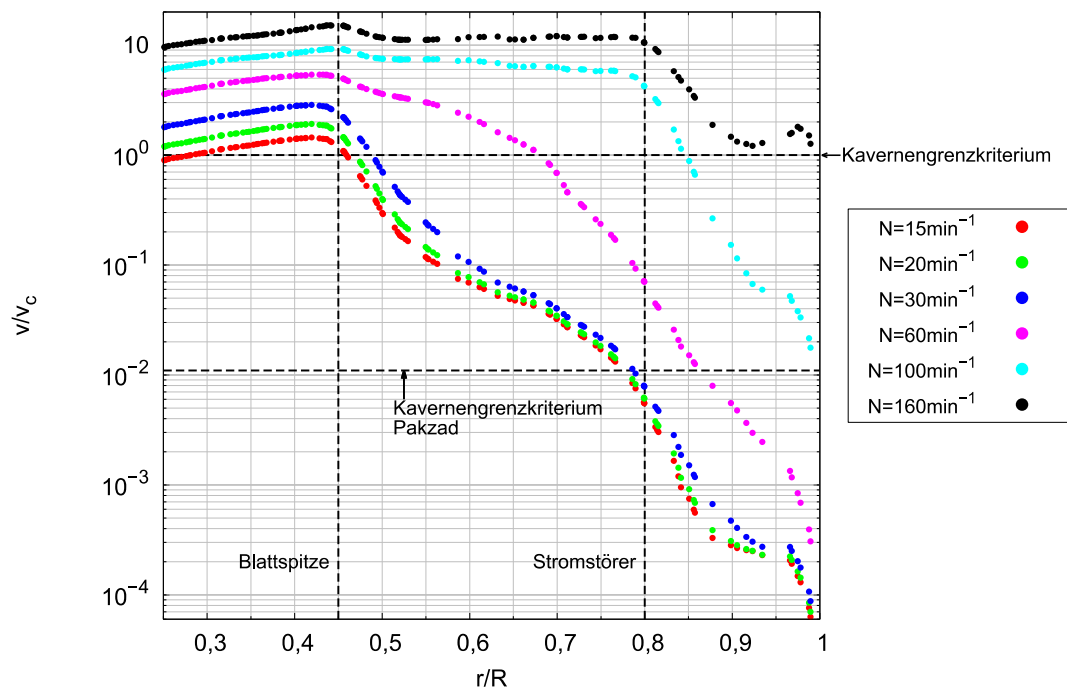


Abbildung Anhang A.6: Schnittdarstellung des numerischen Rechengitters auf Rührermittlebene ($z = 0,21$ m), konformer Übergang der Gitterknotenpunkte am Interface zwischen rotierendem (innen) und stationärem (außen) Bereich

A.10 Geschwindigkeitsprofile für Xanthan 1,0% und 0,5%

a)



b)

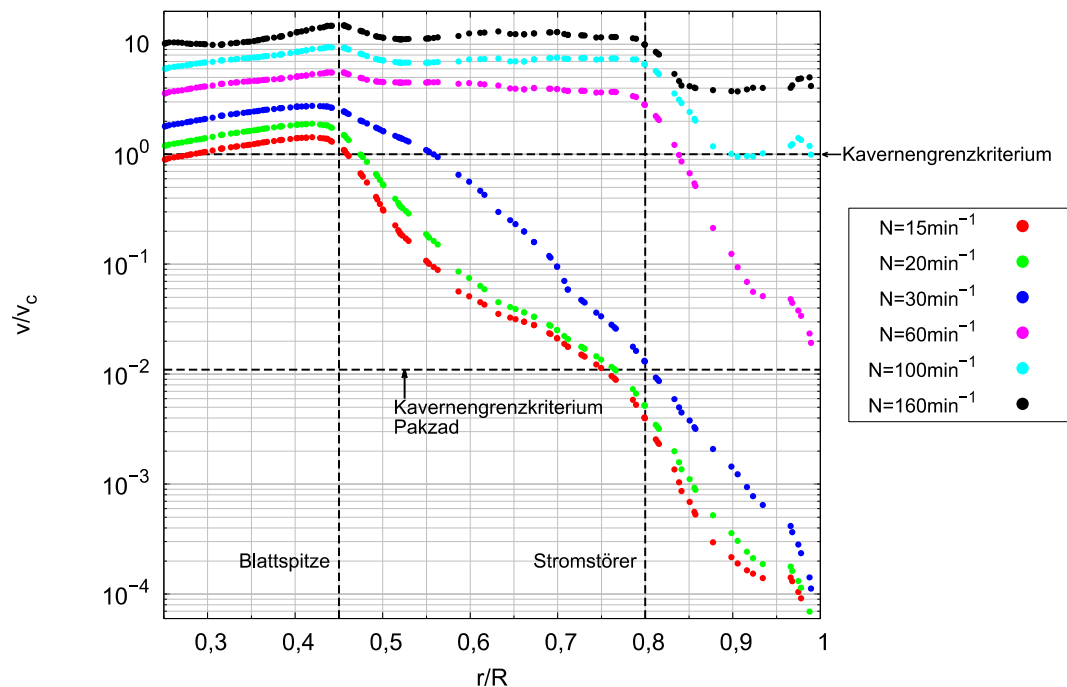
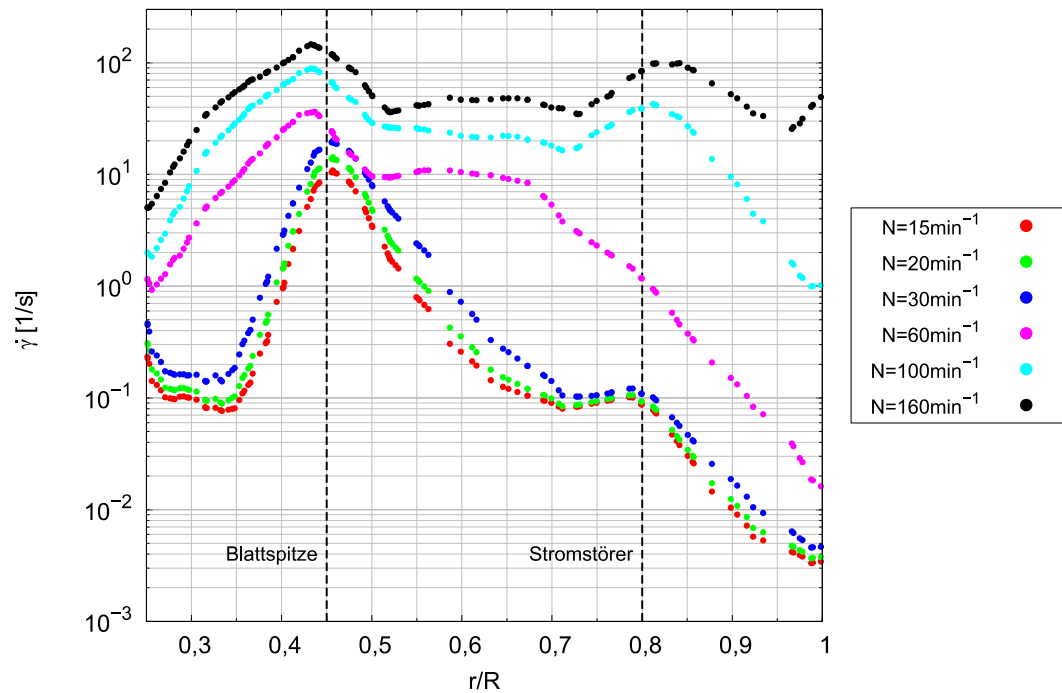


Abbildung A.10: Simulative Geschwindigkeitsprofile bezogen auf die Kavernengrenzgeschwindigkeit für (a) Xanthan 1,0% und (b) Xanthan 0,5% bei ausgewählten Rührerdrehzahlen. Auswertung auf der in Abbildung 4.13 abgebildeten Messlinie, Markierung des verwendeten Kavernengrenzkriteriums im Vergleich zu Pakzad [Pakzad 2007], Projektion der radialen Positionen der Rührerblattspitze und des Stromstörers.

A.11 Scherratenprofile für Xanthan 1,0% und 0,5%

a)



b)

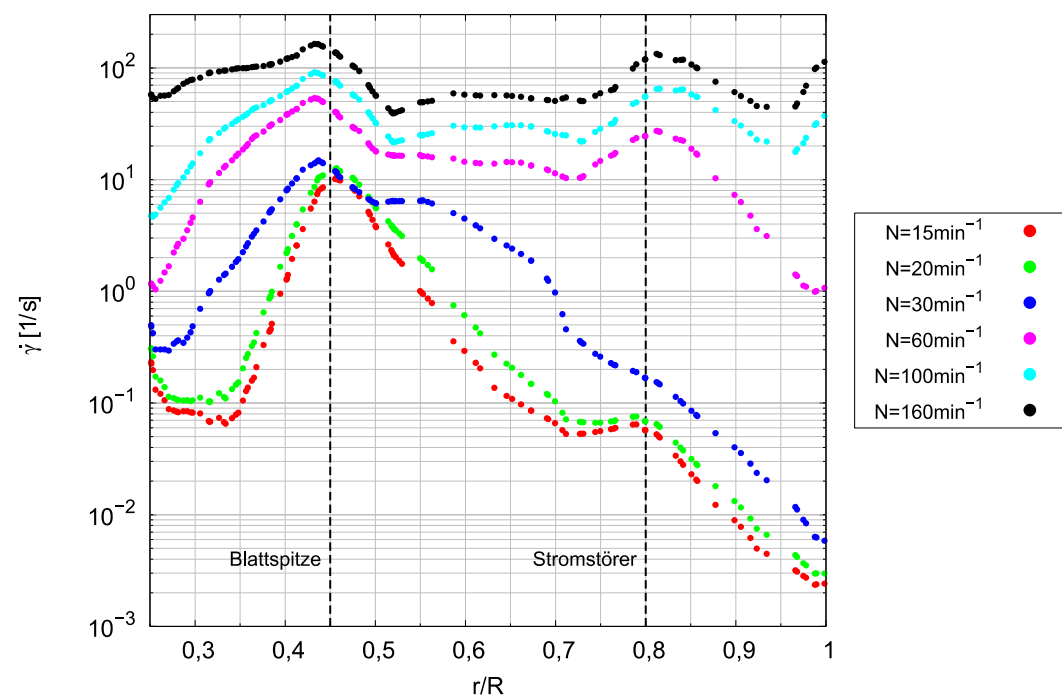


Abbildung A.11: Simulative Scherratenprofile für (a) Xanthan 1,0% und (b) Xanthan 0,5% bei ausgewählten Rührerdrehzahlen

Auswertung auf der in Abbildung 4.13 abgebildeten Messlinie, Projektion der radialen Positionen der Rührerblattspitze und des Stromstörers



<http://www.springer.com/978-3-658-14533-0>

Numerische Untersuchungen zur Mischgüte beim
Rühren von viskoplastischen Fluiden
Strömungssimulation für die Analyse von gerührten,
rheologisch komplexen Fluiden
Ehrentraut, M.
2016, XI, 86 S. 44 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-658-14533-0