

LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM II
WINTERSEMESTER 22/23

Viskoelastizität (Rheologie)

Guido Osterwinter und Jan-Philipp Christ

München, den 17. Dezember 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung und Motivation	3
2	Theoretischer Hintergrund	3
2.1	Elastizität und Viskosität	3
2.2	Klassifizierung von Flüssigkeiten anhand ihres Fließverhaltens .	5
2.3	Viskoelastizität	6
2.4	Rotationsrheometer	8
3	Versuchsdurchführung	8
3.1	Wasser-Saccharose	8
3.2	Wasser-Guaran	9
3.2.1	Anmischen der Lösungen	9
3.2.2	Scherratenmessungen	9
3.2.3	Frequenzversuch	10
4	Ergebnisse und Diskussion	11
4.1	Wasser-Saccharose	11
4.1.1	Scherratenmessungen	11
4.1.2	Fehlerabschätzung zum Anmischen der Lösungen	15
4.2	Wasser-Guaran	17
4.2.1	Scherratenmessungen	17
4.2.2	Fehlerabschätzung zum Anmischen der Lösungen	23
4.2.3	Fehlerbetrachtung Scherratenmessungen	24
4.2.4	Frequenzversuch	25
4.2.5	Fehlerbetrachtung Frequenzversuch	27
5	Zusammenfassung	28
A	Ergänzende Plots	30
A.1	Bestimmung der Konzentrationsabhängigkeit zu Saccharose . . .	30
A.2	Bestimmung der Überlappungskonzentration von Guarán	35
B	Python-Skripte zur Auswertung	41
B.1	Bestimmung des Potenzgesetzes für Saccharose	41
B.2	Bestimmung des Potenzgesetzes für die Messdaten aus der Li- teratur	50
B.3	Bestimmung des Potenzgesetzes für Guarán	54
B.4	Bestimmung der Konzentrationsabhängigkeit der Viskosität bei Saccharose	64
B.5	Bestimmung der Konzentrationabhängigkeit der Viskosität bei Guaran	68
B.6	Frequenzversuch	73

1. Zielsetzung und Motivation

Die Rheologie befasst sich mit dem Fließen und der Verformung von Materie, also mit dem Verhalten von Flüssigkeiten und Feststoffen unter dem Einfluss äußerer Kräfte. Die Viskoelastizität ist ein Teilgebiet der Rheologie, das die mechanischen Eigenschaften von Materialien untersucht, die sich wie eine Kombination aus einer viskosen Flüssigkeit und einem elastischen Festkörper verhalten. Viskoelastische Materialien zeigen sowohl viskoses als auch elastisches Verhalten als Reaktion auf Scherung oder andere mechanische Belastungen und sind beispielsweise in medizinischen oder industriellen Anwendungen von Relevanz.

Konkret sollen im Rahmen des hier vorgestellten Versuchs die viskoelastischen Eigenschaften von wässrigen Saccharose-Lösungen (Zuckerwasser) und von wässrigen Guaran-Lösungen verschiedener Konzentrationen untersucht werden. Für die genannten Lösungen werden unter Verwendung eines Rotationsrheometers die Scherrate und der Scherstress in Abhängigkeit der Scherrate vermessen.

Zuletzt wird eine 0.5-prozentige Wasser-Guaran-Lösung einer oszillatorischen Scherverformung, wobei die Oszillationsfrequenz bei fester Amplitude variiert wird, ausgesetzt, um damit die Abhängigkeit der viskoelastischen Materialantwort von der Frequenz zu beleuchten.

2. Theoretischer Hintergrund

Sofern nicht anders angegeben, stützen sich die Darstellungen in diesem Abschnitt auf [1]. Dieser wurden ebenfalls die gezeigten Bilder entnommen.

2.1. Elastizität und Viskosität

Ein Material heißt elastisch, wenn es, nachdem eine äußere Kraft angelegt wurde, eigenständig wieder in seine Ursprungsform zurückkehrt. Die gegensätzliche Eigenschaft zur Elastizität ist die Viskosität. Ein Material hat viskose Eigenschaften, wenn es, nachdem eine äußere Kraft angelegt wurde, in der Form bleibt, die es durch die äußere Kraft angenommen hat.

Aus dem Alltag kennen wir viele Stoffe, welche sich weder ausschließlich elastisch noch ausschließlich viskos verhalten, sondern sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften haben. Solche Stoffe bezeichnet man als viskoelastisch.

Bei den elastischen Materialien gibt es eine wichtige Untergruppe: solche mit linear elastischem Verhalten. Ein Material heißt linear elastisch, wenn sich die Verformung beim Anlegen einer äußeren Kraft proportional zu der äußeren Kraft ändert, und sich die Verformung nicht ändert solange die äußere Kraft konstant bleibt. Die Verformungen welche man hierbei typischerweise betrachtet sind die relative Dehnung $\Delta L/L$ und der Scherwinkel $\gamma \approx \Delta L/h$.

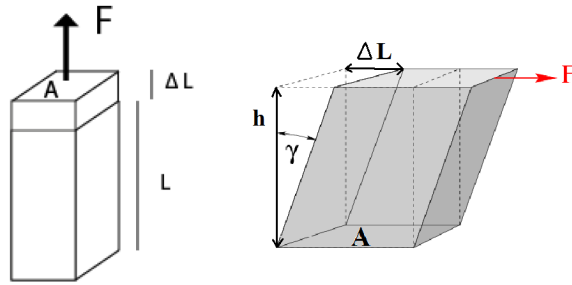


Abbildung 1 Skizze zur Dehnung und Scherung

Die Proportionalitätskonstanten, welche die Verformungen mit den entsprechenden Kräften verbinden sind, das elastische Modul E , wobei

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

und das Schermodul G , wobei

$$\frac{F}{A} = G \frac{\Delta L}{h} \quad (2)$$

Es gibt allerdings auch Materialien bei denen sich die Verformungen nicht proportional zu den äußeren angelegten Kräften verhalten, wie z.B. Gummis oder andere Stoffe, die aus langen Polymermolekülen bestehen. Aus der Alltagserfahrung heraus wissen wir auch, dass sich einige Stoffe viskoser, d.h. dickflüssiger verhalten als andere Stoffe. Aber wie kann man dieses Verhalten quantifizieren? Um die Viskosität eines Stoffes zu quantifizieren, wird beispielhaft folgender Aufbau benutzt:

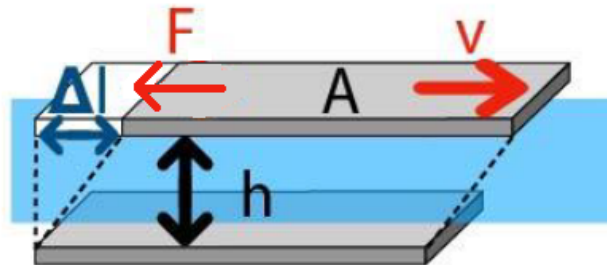


Abbildung 2 Experimentelle Viskositätsbestimmung

Hierbei füllt ein Stoff den Raum zwischen zwei parallelen Platten mit der Oberfläche A aus. Bewegt sich die obere Platte nun mit der Geschwindigkeit v über den Stoff, wird der Stoff eine Bremskraft $F(v)$ auf die Platte ausüben. Anschaulich ist klar, dass für die Bremskraft $F(v)$ gelten wird $F(v) \sim v \cdot A/h$. Die Viskosität η ist dann als

Proportionalitätskonstante definiert über die Gleichung

$$F(v) = \eta(v) \cdot v \cdot \frac{A}{h} \quad (3)$$

Mit den Größen $\dot{\gamma} \approx v/h$ (Scherrate) und $\sigma(v) = F(v)/A$ (Scherstress), kann man die Gleichung vereinfachen zu

$$\sigma(\dot{\gamma}) = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

Die Viskosität η ist eine Größe, welche, wie wir im Verlauf der beiden Experimente noch bestätigen werden, allgemein von der Scherrate $\dot{\gamma}$ abhängig ist.

Betrachtet man, wie hier in den Experimenten, Lösungen von bestimmten Stoffen mit Wasser, so ist die Viskosität einer Lösung auch konzentrationsabhängig. Für viele Stoffe liegt hier ein linearer Zusammenhang $\eta = \eta_0 + [\eta]c$ vor, wobei η_0 die Viskosität von Wasser ist, und $[\eta]$ die sogenannte intrinsische Viskosität des gelösten Stoffes. Für Stoffe aus langen Polymermolekülen gilt diese Beziehung i.A. nicht. Hier nimmt die Viskosität in Abhängigkeit der Konzentration allgemein folgenden Verlauf an.

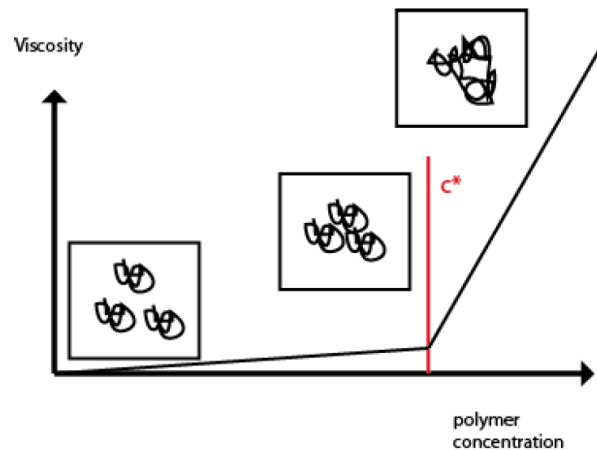


Abbildung 3 Polymerlösungen

Die Konzentration, bei der der charakteristische Knick auftritt, ist die sogenannte kritische Konzentration oder Überlappkonzentration c^* . Ab hier beginnen sich die Polymere aufgrund ihrer Größe mehr und mehr zu überlappen und ineinander zu verschlaufen, wodurch die Viskosität stark mit der Konzentration ansteigt.

2.2. Klassifizierung von Flüssigkeiten anhand ihres Fließverhaltens

Abhängig von der molekularen Struktur einer Flüssigkeit kann die Viskosität in unterschiedlicher Art und Weise von der Scherrate abhängen. Man unterscheidet im wesentlichen drei Fälle.

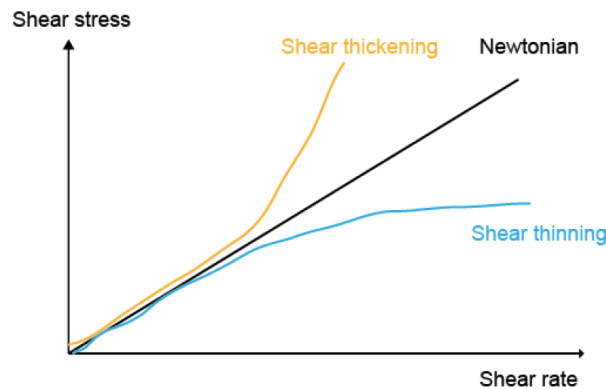


Abbildung 4 Unterschiedliche Fließverhalten im $\sigma - \dot{\gamma}$ -Diagramm

- Newtonsches Fließverhalten:

Newtonsche Flüssigkeiten zeichnen sich durch eine konstante Viskosität in einem großen Scherratenbereich aus. Der Scherstress ist daher bei diesen Flüssigkeiten direkt proportional zur Scherrate. Beispiele sind Wasser, Öl, Glycerol oder Honig.

- Scherverdünnung:

Von Scherverdünnung spricht man, wenn die Viskosität mit der Scherrate abnimmt. Sie tritt auf, wenn die molekulare Struktur der Probe aufgrund hydrodynamischer Kräfte, die durch die Scherung erzeugt werden, zerstört wird. Daher führt eine Erhöhung der Scherrate nur zu einer unterproportionalen Erhöhung des Scherstress. Beispiele sind Duschgel, Joghurt, Zahnpasta, Marmelade.

- Scherverdickung:

Von Scherverdickung spricht man wenn die Viskosität mit der Scherrate zunimmt. Die Ursache für Scherverdickung ist eine Volumenzunahme, oder eine Zunahme der Anzahl der strukturellen Untereinheiten der Probe, aufgrund der Scherung. Daher steigt der Scherstress überproportional mit der Scherrate an. Beispiel: Stärkelösung.

Die Abhängigkeit des Scherstress von der Scherrate kann nach dem Fließgesetz nach Ostwald und de Waele (\rightarrow [2]) durch ein Potenzgesetz der Form

$$\sigma(\dot{\gamma}) = \beta \dot{\gamma}^\alpha \quad (5)$$

beschrieben werden. Für $\alpha = 1$ liegt Newtonsches Fließverhalten vor, für $\alpha < 1$ Scherverdünnung und für $\alpha > 1$ Scherverdickung.

2.3. Viskoelastizität

Zeigt ein Material sowohl elastisches und viskoses Verhalten, so kann dessen Antwort für hinreichend kleine Scherungen/ Deformationen/ Dehnungen als linear angenommen

werden. Dies führt für rein elastische Materialien zum Modell des Hookschen Körpers und für rein viskose Flüssigkeiten zu dem Modell der newtonschen Flüssigkeiten, die als Netzwerk von kleinen, bei Auslenkung Energie dissipierenden, Kolben beschrieben werden können. Das Maxwell-Modell kombiniert diese beiden Modelle, indem Materialien mit sowohl viskosen als auch elastischen Eigenschaften als Netzwerke von in Serie geschalteten Federn und Kolben interpretiert werden.

Legt man an solche Körper eine oszillatorische Verformung

$$\gamma(t) = \text{Re} \left(\gamma_0 e^{i\omega t} \right) \quad (6)$$

an, so teilt sich die Stressantwort des Materials nach dem Maxwell-Modell in einen Term proportional zur Scherung und in einen Term proportional zur Scherrate auf, sodass

$$\sigma(t) = \text{Re} (G\gamma(t) + \eta\dot{\gamma}(t)) = \text{Re} \left(G\gamma_0 + \gamma_0\eta \cdot i\omega e^{i\omega t} \right) =: \text{Re} \left(\sigma_0 e^{i\omega t + \delta} \right) \quad (7)$$

$$= \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \text{Re} (\gamma(t)(\cos \delta + i \cdot \sin \delta)) =: \text{Re} ((G' + iG'') \cdot \gamma(t)) =: \text{Re} (G^* \cdot \gamma(t)) \quad (8)$$

gilt mit dem Verlustmodul $G'' = \eta\omega$ und dem Speichermodul $G' = G$. Die Phase von G^* definiert den Verlustfaktor $\tan \delta \equiv G''/G'$.

Das Verlust- und das Speichermodul sind beide i.A. abhängig von der Art der Verformung. Legt man beispielsweise eine oszillatorische Verschiebung variabler Frequenz mit fester Amplitude an, so ergibt sich für Polymere in Wasserlösung typischerweise das folgende viskoelastische Spektrum:

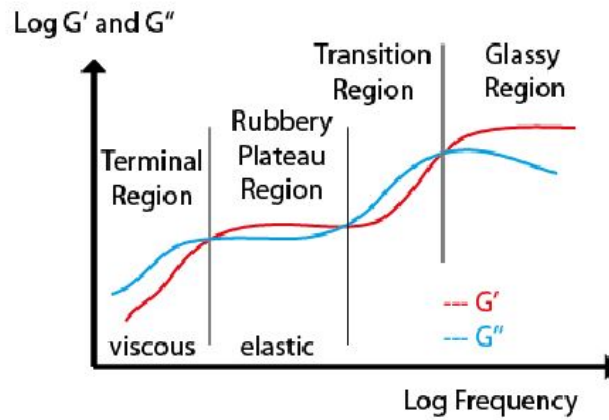


Abbildung 5 Viskoelastisches Spektrum einer Polymerlösung (aus [3])

Für kleine Frequenzen ist $G'' > G'$, wobei beide in guter Näherung linear mit der Frequenz zunehmen. In diesem Bereich hat der Stoff den Charakter einer viskoelastischen Flüssigkeit. Nachdem sich Speicher- und Verlustmodul gekreuzt haben, sind über einen gewissen Frequenzbereich (die Rubbery Plateau Region) die viskoelastischen Stoffeigenschaften weitestgehend unabhängig von der Frequenz, und der Stoff verhält

sich gelartig oder wie ein viskoelastischer Festkörper. In der sich daran anschließenden Übergangsregion dominieren die viskosen Eigenschaften des Körpers. Für höhere Frequenzen wird die Glassy Region erreicht, in der das Speichermodul plateauartig wird, wohingegen das Speichermodul abnimmt. Der Stoff verhält sich also zunehmend wie ein (elastischer) Festkörper.

2.4. Rotationsrheometer

Im Versuch wurde das Rotationsrheometer KINEXUS ultra+ von Malvern Panalytical verwendet. Die Probe wird zwischen zwei runden Metallplatten aufgetragen, von denen die obere drehbar gelagert ist und mit variabler Winkelgeschwindigkeit Ω rotieren kann. Der Plattenabstand ist variabel, wird aber bei den Messungen hier fest auf $d = 1$ mm gesetzt.

Bei einer viskosen Probe wird durch das Rotieren eine Stressantwort $\sigma \propto \eta$ resultieren, welche proportional zum Drehmoment M ist, welches auf die obere Platte wirkt. Dieses Drehmoment wird mit einer Auflösung von 0.05 nNm gemessen (vgl. [4]), was bei Kenntnis der Normalkraft, die auf die Platte wirkt, und einiger geometrieabhängiger Kenngrößen das Berechnen der Stressantwort und damit der Viskosität zulässt.

Wegen $\eta \propto M$ ist $\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta M}{M}$ und damit der relative Fehler bei der Viskositätsbestimmung für weniger viskose Flüssigkeiten größer.

3. Versuchsdurchführung

3.1. Wasser-Saccharose

Im ersten Experiment wurde die Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate für unterschiedlich konzentrierte Saccharose-Wasserlösungen gemessen. Die untersuchten Konzentrationen waren 0%, 10%, 20% und 40%. Zum Messen der Viskositäten in Abhängigkeit der Scherraten wurde das in Abschnitt 2.4 vorgestellte Rheometer zusammen mit dem Programm 'Shear Rate Table for Waterlike Samples' benutzt. Der Scherratenbereich, in welchem gemessen wurde, ging von 10^0 s^{-1} bis 10^2 s^{-1} mit 5 Messpunkten pro Dekade. Tskip wurde auf 1 min eingestellt. Zum Vermessen der Lösungen wurde jeweils immer etwas mehr Lösung angemischt als das verwendete Rheometer eigentlich gebraucht hätte. Die genau verwendeten Mengen Wasser und Saccharose für die jeweiligen Lösungen können Tabelle 2 entnommen werden.

Beim Anmischen der Lösungen wurde stets darauf geachtet, dass die verwendete Saccharose komplett gelöst war. Die Temperatur, bei welcher die verschiedenen Lösungen vermessen werden sollten, wurde im Bedienprogramm des Rheometers auf 25°C eingestellt. Das Profil der Proben zwischen den beiden Platten des Rheometers hatte jeweils immer in etwa folgende Gestalt:

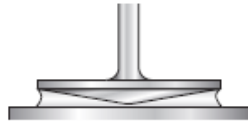


Abbildung 6 Flüssigkeitsprofil bei den Saccharose-Wasserlösungen (aus [3])

Nachdem eine Messreihe fertig war, wurden jeweils die beiden Platten des Rheometers mit einem Tuch und Reinigungsalkohol gereinigt.

3.2. Wasser-Guaran

3.2.1. Anmischen der Lösungen

Prinzipiell gleicht das Vorgehen beim Anmischen und Auftragen der Lösungen auf das Rheometer dem in Abschnitt 3.1. Da Guaran bei Wasserkontakt schnell eine viskose Flüssigkeit bildet, die nur mit großen Schwierigkeiten pipettiert werden kann, wurde die jeweilige Probe unmittelbar vor Messbeginn mit Wasser versetzt. Dabei war auf ein möglichst schnelles Vermischen von Guaran und Wasser zu achten, da Guaran die Tendenz hat, bei Wasserkontakt Klumpen auszubilden, die ein vollständiges Durchmischen der gesamten Pulversubstanz erheblich erschweren. Eine solche Klumpenbildung war bei der 1%igen-Lösung zu beobachten. Durch mehrfaches Pipettieren konnten die Klumpen so weit aufgelöst werden, dass keine mehr mit bloßem Auge zu erkennen waren. Im Prozess bildeten sich in der Flüssigkeit jedoch kleine Luftblasen, die nicht vollständig von der Flüssigkeit getrennt werden konnten. Auf deren Einfluss auf die Messergebnisse wird in Abschnitt 4.2.3 eingegangen.

Eine weitere Schwierigkeit beim Anmischen der Lösungen ist, dass gerade bei höheren Konzentrationen ein nicht unerheblicher Anteil der Substanz wegen der hohen Viskosität nach dem Einziehen in der Pipette verbleibt. In besonderem Maße wurde deshalb beim Loaden des Samples darauf geachtet, dass eine ausreichende Abdeckung des Messstempels am Rheometer erzielt wurde, um Underfilling zu vermeiden. So musste beispielsweise für die 2.3%ige Lösung nachträglich noch Flüssigkeit hinzugefügt werden, da anfangs nicht das gesamte Volumen unter der Geometry-Platte von Flüssigkeit ausgefüllt wurde. Auf diese Weise wurde ein Zustand erreicht, bei dem die Flüssigkeit sich so aus dem Spalt herauskrümmte, dass der Krümmungsradius unterhalb der Geometry lag.

3.2.2. Scherratenmessungen

Die sich anschließende Messung wurde nach Vornehmen der entsprechenden Einstellungen unter Toolkit_V001 Shear Rate Table mit $\dot{\gamma} \in [1, 100]\text{s}^{-1}$, $T = 25^\circ\text{C}$, 5 Messpunkten pro Dekade und dem Parameter Tskip nach 1 min vom Rheometer automatisiert durchgeführt, woraufhin die Messwerte als Tabelle exportiert werden konnten.

Es wurden Konzentrationen $c \in [0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.4, 2.0, 2.3]\%$ untersucht, wobei die

Messwerte für die reine Wasserlösung mit $c = 0.0\%$ aus der vorangegangenen Saccharose-Messreihe übernommen werden konnten.

3.2.3. Frequenzversuch

In diesem Versuchsteil sollte eine 0.5%ige Guaran-Lösung einer oszillatorischen Scherverformung ausgesetzt werden. Es wurde dieselbe Probe, mit der auch die entsprechende Messung in Abschnitt 4.2.1 durchgeführt wurde, verwendet. Der eigentliche Messprozess lief automatisiert nach Aufrufen des entsprechenden Programms Toolkit_O002 Frequency Table in der Rheometer-Software und dem Einstellen des Messbereichs von 0.01 – 200 Hz, der Soll-Temperatur $T = 25^\circ\text{C}$ und der Anzahl (5) von Messpunkten pro Dekade. Tskip wurde auf 1 min gesetzt, die Stärke der Scherverformung betrug 0.5%.

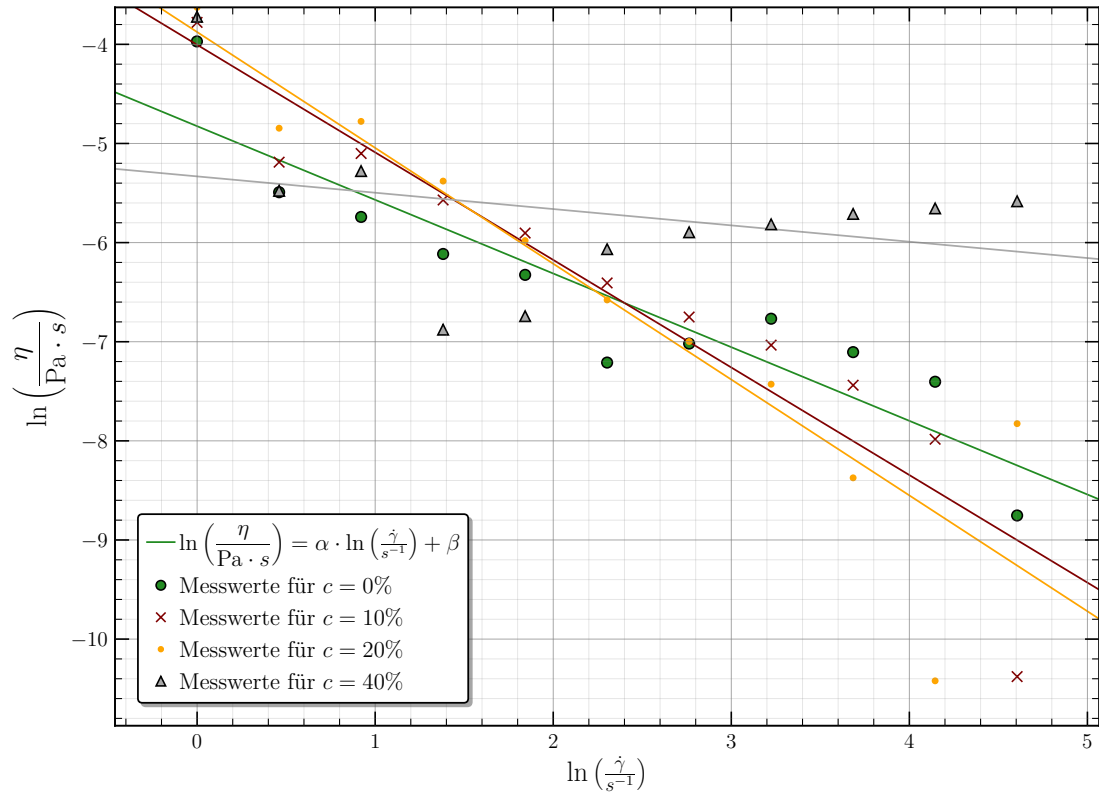
Aufgezeichnet wurden das Speichermodul G' und das Verlustmodul G'' als Funktion der Oszillationsfrequenz bei konstanter Amplitude der Scherverformung.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Wasser-Saccharose

4.1.1. Scherratenmessungen

Die Messreihen der Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate für die verschiedenen Saccharose-Wasser-Lösungen sowie die zugehörigen Fitgeraden sind in folgendem Diagramm dargestellt:



	$c = 0\%$	$c = 10\%$	$c = 20\%$	$c = 40\%$
α	-0.743 ± 0.11	-1.085 ± 0.13	-1.169 ± 0.16	-0.165 ± 0.17
β	-4.825 ± 0.29	-4.005 ± 0.34	-3.876 ± 0.43	-5.332 ± 0.47

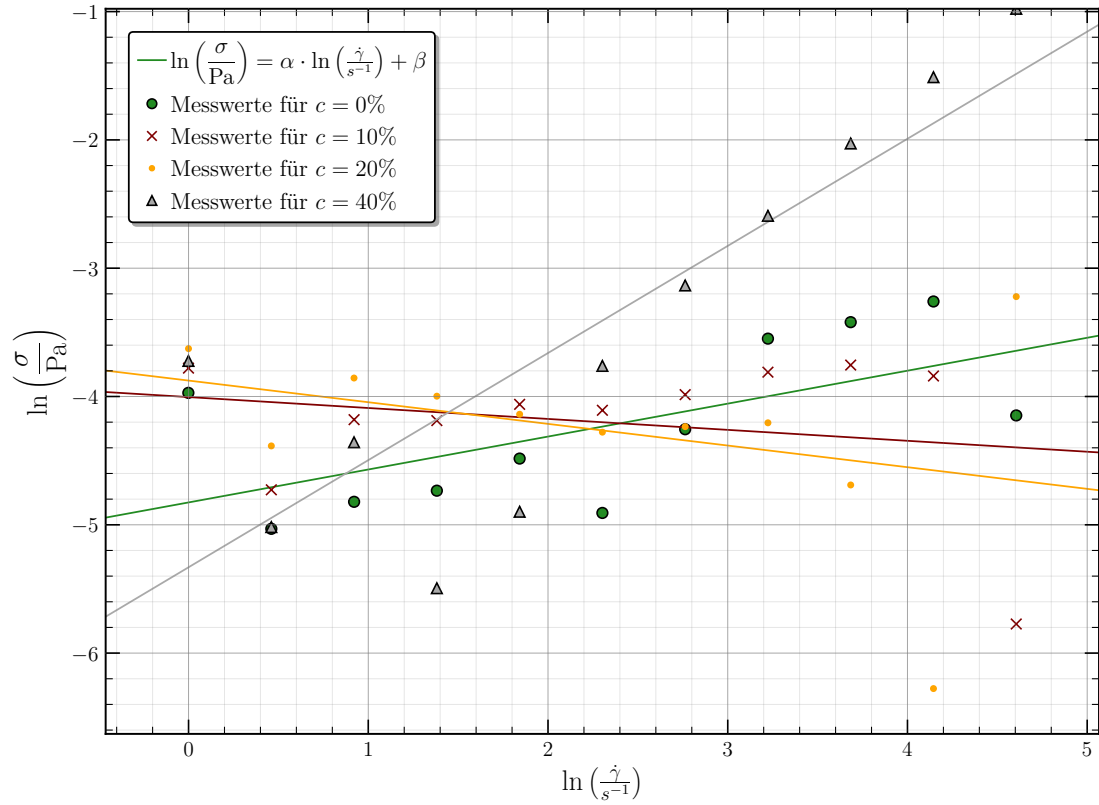
Plot 1 Auftragung von η gegen $\dot{\gamma}$ bei Saccharose

Aus den Steigungen und Ordinatenverschiebungen der Fitgeraden kann man gemäß

$$\eta = e^{\beta} \gamma^{\alpha} \iff \ln(\eta) = \alpha \cdot \ln(\dot{\gamma}) + \beta \quad (9)$$

für die einzelnen Lösungen die Potenzgesetzbeziehung zwischen Scherrate und Viskosität bestimmen. Im nachfolgenden Diagramm sind für die verschiedenen Lösungen, die sich

aus den Messwerten ergebenden Scherspannungen σ gegen die Scherrate $\dot{\gamma}$ aufgetragen, wodurch gegenüber Plot 1 wegen der Beziehung $\sigma = \eta\dot{\gamma}$ keinerlei neue Information gewonnen wird:



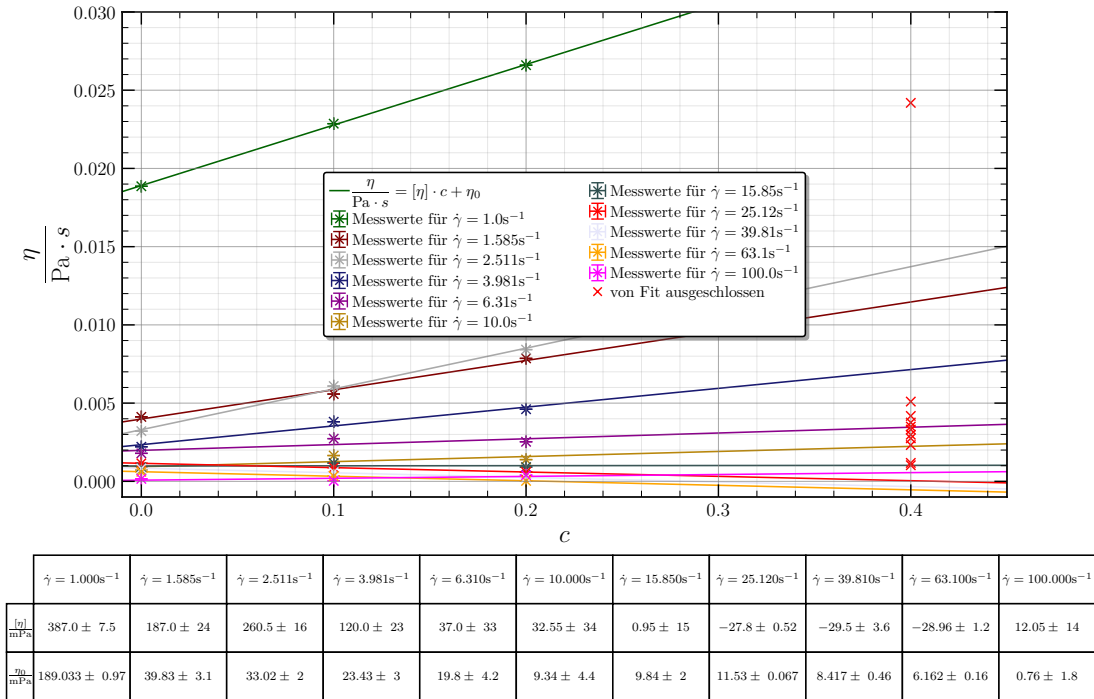
	$c = 0\%$	$c = 10\%$	$c = 20\%$	$c = 40\%$
α	0.257 ± 0.11	-0.085 ± 0.13	-0.169 ± 0.16	0.835 ± 0.17
β	-4.826 ± 0.29	-4.004 ± 0.34	-3.876 ± 0.43	-5.331 ± 0.47

Plot 2 Auftragung von σ gegen $\dot{\gamma}$ bei Saccharose

Da die Steigungen aller vier Fitgeraden < 1 sind, deuten die Messwerte für alle vier Lösungen qualitativ auf Scherverdünnung hin. Da jedoch $[\alpha - \Delta\alpha, \alpha + \Delta\alpha] = [0.835 - 0.17, 0.835 + 0.17] \cap [1, +\infty) \neq \emptyset$, kann prinzipiell die These, die 40%ige Lösung verhalte sich newtonsch oder scherverdickend, nicht verworfen werden, wenngleich sie unwahrscheinlich erscheint. Auch muss für alle Messreihen die starke Streuung der Messwerte angemerkt werden, was es erschwert, jeweils einen klar linearen Trend auszumachen. Dies äußert sich in den großen relativen Unsicherheiten der Fitparameter α, β bei allen Konzentrationen.

Im nächsten Diagramm sind für die verschiedenen Scherraten, für welche die vier Messreihen aufgenommen wurden, die Viskositäten in Abhängigkeit der Konzentrationen der

Lösungen dargestellt:



Plot 3 Auftragung von η gegen c bei Saccharose

Beim Erstellen der Fitgeraden für die verschiedenen Scherraten wurden hier allerdings die Messwerte der 40%igen Saccharoselösung ausgeschlossen, da diese dem linearen Trend, der klar von den anderen drei Lösungen vorgegeben wird, widerspricht. Auf den Umstand, warum ein anderes Verhalten bei den Messwerten zur 40%igen Saccharoselösung plausibel ist, wird später noch eingegangen.

Die sich aus den Fitgeraden ergebenden intrinsischen Viskositäten $[\eta]$ für Saccharose sind in der Tabelle in Plot 3 aufgeführt. Aufgrund der sehr schwankenden Werte ist es hier aber nicht sinnvoll für diese einen Mittelwert anzugeben, sodass nicht abschließend ein Wert für die intrinsische Viskosität von Saccharoselösungen angegeben werden kann.

Abgesehen von den Messwerten der 40%igen Saccharoselösung, die bei dem Fit in Plot 3 nicht berücksichtigt wurden, zeigen alle anderen Messwerte jeweils nur sehr geringe Abweichungen zu ihrer jeweiligen Fitgeraden. Dies ist konsistent mit dem gemäß Abschnitt 2.1 für Saccharoselösungen zu erwartenden linearen Zusammenhang zwischen Konzentration und Viskosität. Denn Saccharosemoleküle sind keine langen Kettenmoleküle und haben daher nur wenig Tendenz, sich zu verhaken, sodass für Saccharoselösung eine feste Steigerung oder Verringerung der Konzentration unabhängig von der Ausgangskonzentration die gleiche Änderung in der Viskosität verursacht. Für Saccharoselösungen ist zu erwarten, dass diese sich in einem Scherratenbereich von 1s^{-1} bis 130s^{-1} newtonsch verhalten ([5], S.37). Dies steht im Widerspruch zu den in Plot 1 dargestellten Mess-

werten. Lediglich für die 40%ige Lösung haben wir gemäß Plot 2 Viskositätsmesswerte erhalten, welche in etwa konstant sind. Das scherverdünnende Verhalten der 0, 10 und 20 prozentigen Lösungen, welches in Plot 1 und Plot 2 beobachtet werden kann, kann dadurch erklärt werden, dass die Lösungen die im Messprogramm eingestellte Soll-Temperatur von 25°C beim Start der Messreihen wahrscheinlich noch nicht erreicht hatten, und sich noch während der Messreihendurchführung weiter aufgewärmt haben. Dies erscheint besonders plausibel, da, wie Stadler in Ziffer 2.1.2 in [6] anmerkt, die vom Rheometer bestimmte Temperatur nicht *im* Sample gemessen wird, sondern in der Platte darunter oder darüber.

Die Lösungen bei den kleinen Scherraten waren also wahrscheinlich immer noch etwas kälter waren als bei den großen Scherraten, da das Rheometer die Viskositäten zuerst für die kleinen Scherraten gemessen hat. Und da die Viskosität eines Stoffs allgemein mit steigender Temperatur abnimmt, ergibt sich dadurch die scheinbare Scherverdünnung. Verstärkt wird dieser Effekt durch die geringe Umgebungstemperatur von $\sim 13^{\circ}\text{C}$ im Versuchsraum, welche es unwahrscheinlich erscheinen lässt, dass sich das Sample in der Aufwärmphase an die im Rheometer eingestellte und gemessene Temperatur einstellen konnte.

Der Unterschied der drei Messreihen zu $c = 0\%, 10\%, 20\%$ zur Messreihe der 40%igen Lösung ist, dass der 40%igen Lösung mehr Zeit gegeben wurde sich vor Messbeginn auf die 25°C aufzuwärmen aufgrund des Umstands, dass diese Messung vor der Mittagspause gestartet wurde und der Aufwärmprozess deshalb voll durchlaufen konnte.

D.h. bei einer erneuten Versuchsdurchführung ist genauer darauf zu achten, dass den Proben auch wirklich genug Zeit gegeben wird, ihre Soll-Temperaturen zu erreichen. Denkbar wäre es, die angemischten Lösungen zuvor in ein (temperiertes) Wasserbad zu legen, um sie vorzuheizen. Vor dem Loaden des Samples könnte die Temperatur mit einem Thermometer überprüft werden.

Vor diesem Hintergrund sind die Viskositätsmesswerte für die hohen Scherraten wahrscheinlich auch die genauesten und weichen von Plot 3 von den Messwerten zu den übrigen Konzentrationen ab. Vergleicht man die Viskositätsmesswerte der hohen Scherraten für die verschiedenen Konzentrationen mit den tabellierten Literaturwerten aus [7] auf S.4, ergibt sich, dass die Literaturwerte größer sind als unsere gemessenen Werte:

$c[\%]$	$\eta[\text{mPa} \cdot \text{s}]$	
	Literatur	Messwerte für $\dot{\gamma} > 20 \text{ s}^{-1}$
10	1.13	< 0.91
20	1.7	< 0.75
40	5.17	< 3.7

Tabelle 1: Viskosität bei hohen Scherraten

Dies liegt wahrscheinlich am 'Underfilling', also dass wir aufgrund mangelnder Erfahrung die Proben, welche wir zwischen die Platten der Rheometers gegeben haben, stets etwas zu klein gewählt haben. Denn im Profil hatten unsere Proben immer etwa die in Abbildung 6 gezeigte Gestalt. Bei korrekter Größe der Proben hätte das Profil aber

immer wie folgt aussehen sollen:

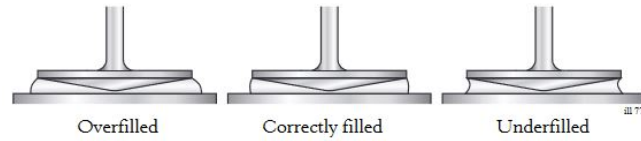


Abbildung 7 Zur korrekten Platzierung des Samples (aus [3])

Wie in [8] auf S.3 erwähnt, kann aber bereits eine $100\text{ }\mu\text{m}$ große Änderung des Radius r der Probe zu einem 1.6%igen Fehler in der gemessenen Viskosität führen, wobei das konkrete Ausmaß des Fehlers natürlich noch vom Soll-Radius der Probe abhängt. Die von Hellström angegebenen Werte sind hier nur genannt, um zu verdeutlichen, wie stark die Viskosität vom Sample-Radius abhängt.

Da eine kleinere Probe ein kleineres Rückstellmoment erzeugt, welches das Rheometer misst, um daraus die Viskosität zu berechnen, führt eine kleinere Probe auch zu kleineren Viskositätsmesswerten. Bei einer erneuten Versuchsdurchführung ist also insbesondere genauer darauf zu achten dass das Profil der Proben zwischen den beiden Rheometerplatten der Vorschrift in Abbildung 7 folgt.

4.1.2. Fehlerabschätzung zum Anmischen der Lösungen

Es ist interessant, abzuschätzen, ob mit den verwendeten Wasser- und Saccharosemengen tatsächlich die gewünschten Konzentrationen erreicht werden konnten, da beim Anmischen einige Vereinfachungen angenommen wurden: So wurde beim Abmessen der Wassermenge, die notwendig ist, um gegeben einer zu lösenden Stoffmenge eine bestimmte Konzentration zu erreichen, die Dichte von Wasser auf $\rho_W = 1\text{ }\frac{\text{g}}{\text{ml}}$ gesetzt. Dies gilt bei Raumtemperatur und Normaldruck nicht exakt.

Mittels [9] kann die Dichte bei Raumtemperatur $T = 25^\circ\text{C}$ und Normaldruck mit $\rho = (0.99705 \pm 0.0015)\text{ }\frac{\text{g}}{\text{ml}}$ angegeben werden. Die Unsicherheit kommt dadurch, dass das Wasser erstens wahrscheinlich eine geringere Temperatur als die Luft im Labor hatte, da das Wasser auch über gewisse Zeiten hinweg im deutlich kälteren Versuchsraum mit dem Rheometer stand, und zweitens der Luftdruck nicht genau bekannt ist.

Ferner wurden die Messunsicherheiten der verwendeten Präzisionswaage und Pipette vernachlässigt. Die Unsicherheit in Messungen der Waage werden auf $\Delta m = 0.0002\text{ g}$ und die Unsicherheit bei Messungen mit der Pipette auf $\Delta V = 2\text{ }\mu\text{l}$ geschätzt. Damit lassen sich die folgenden Werte für die relativen Unsicherheiten in den Stoffkonzentrationen gewinnen:

$c[\%]\text{-Soll}$	$V_{\text{H}_2\text{O}}[\mu\text{l}]$	$m[\text{g}]$	$c = \frac{m}{\rho \cdot V + m}[\%]$	$\Delta c[\%]$	$\frac{\Delta c}{c}[\%]$
10	1233	0.13736	10.0503	0.02394	0.2382
20	857	0.21426	20.0481	0.04695	0.2342
40	518	0.34569	40.0957	0.10049	0.2506

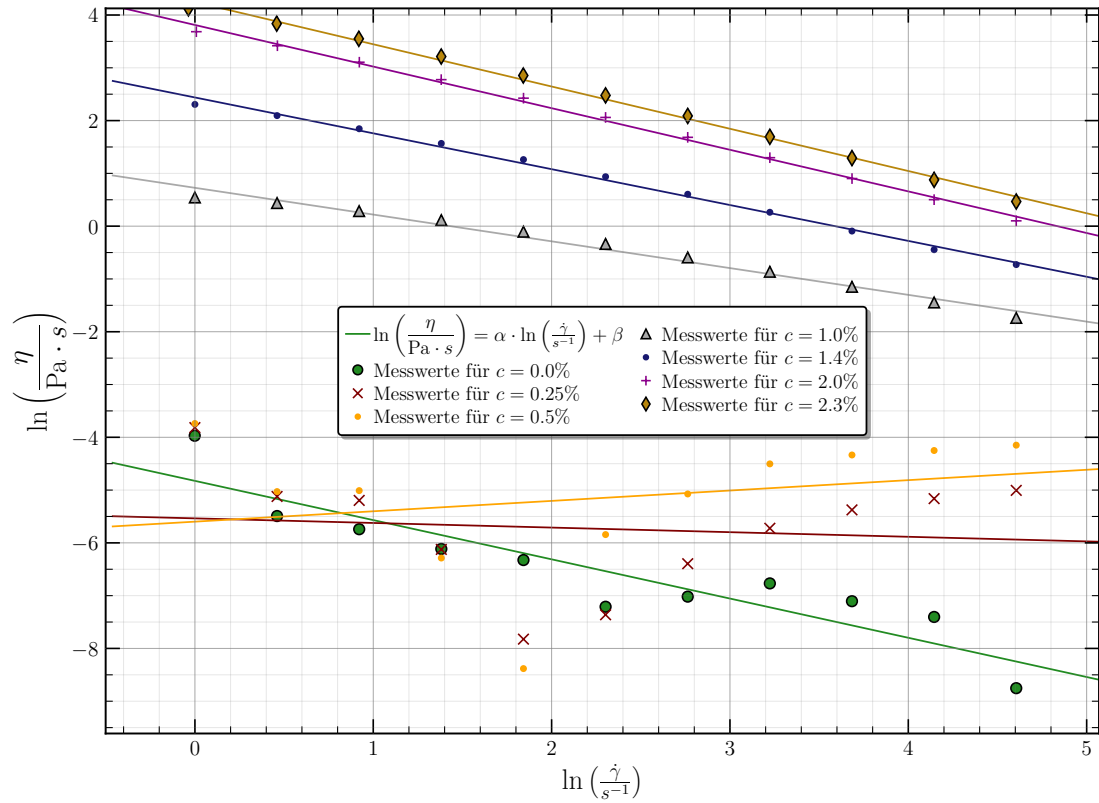
Tabelle 2: Saccharose-Konzentrationen

Die Konzentrationen hatten also im Rahmen der geringen Messunsicherheit in der Tat die Soll-Konzentration der jeweiligen Stoffe, sodass eine zu große oder zu kleine untersuchte Konzentration wegen ungenau abgemessener Massen oder Volumina bei den Saccharose-Wasser-Lösungen keine relevante Fehlerquelle ist und die in Tabelle 1 auftretende Diskrepanz nicht erklären kann.

4.2. Wasser-Guaran

4.2.1. Scherratenmessungen

Trägt man die für die verschiedenen Konzentrationen und Scherraten aufgenommenen Messwerte gegeneinander auf, so können die Werte $(\eta_i, \dot{\gamma}_i)$ für feste Konzentration c nach dem Fließgesetz von Ostwald und de Waele (vgl. [2]) in einem doppelt-logarithmischen Plot durch Geraden beschrieben werden.



	$c = 0.0\%$	$c = 0.25\%$	$c = 0.5\%$	$c = 1.0\%$	$c = 1.4\%$	$c = 2.0\%$	$c = 2.3\%$
α	-0.743 ± 0.11	-0.087 ± 0.25	0.197 ± 0.28	-0.507 ± 0.021	-0.6794 ± 0.014	-0.7883 ± 0.014	-0.8004 ± 0.017
β	-4.825 ± 0.29	-5.536 ± 0.67	-5.598 ± 0.76	0.7265 ± 0.059	2.4383 ± 0.039	3.8117 ± 0.037	4.2465 ± 0.045

Plot 4 Doppelt logarithmische Auftragung von η gegen $\dot{\gamma}$ bei Guarán

Rein qualitativ stellt man durch Inspektion von Plot 4 fest, dass die Messwerte für $c \in [1.0, 1.4, 2.0, 2.3]\%$ gut durch eine Gerade beschrieben werden können, was die Gültigkeit des Fließgesetzes von Ostwald und de Waele stützt und sich in einer geringen Standardabweichung der Fitparameter α („Steigung“) und β („Verschiebung entlang der Ordinate“) niederschlägt. In guter Näherung parallel zu den vier genannten Geraden verläuft die Fitgerade, die die Messwerte für die reine Wasserlösung beschreiben soll. Es

fällt die große Streuung der Messwerte auf, was auf die Bemerkung in 2.4, wonach der relative Fehler in der Viskosität bei weniger viskosen Flüssigkeiten größer sein sollte, zurückzuführen ist. Durch den größeren Fehler bei jedem Messwert wird die statistische Streuung um die Fitgerade und damit auch die Unsicherheit der Fitparameter α, β größer.

Unerwartet hingegen ist das Verhalten, das sich für $c = 0.25\%$ und $c = 0.5\%$ zeigt. Für die 0.5% ige Lösung legt der Fit gar ein $\alpha > 0$ nahe, was bedeuten würde, dass die untersuchte Lösung *scherverdickendes* Verhalten zeigen würde. Dies steht im Widerspruch dazu, dass Guarán nach [10] stark *scherverdünnende* Eigenschaften hat. Tatsächlich ist aber ein lineares Modell höchst unzureichend zur Beschreibung der betreffenden Daten. Denn nur für die letzten 4-5 Messwerte (bei hohen Scherraten) lässt sich ein linearer Zusammenhang (aber mit positiver Steigung!) erahnen. Für kleinere Scherraten sieht es vielmehr so aus, als ob die Daten zwei nach unten geöffneten Hyperbeln folgen würden, die sich etwa bei $\ln\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right) \approx 1.8$ treffen. Entsprechend schwach in der Aussagekraft sind die jeweiligen Fitparameter α , die je mit einer mehr als hundertprozentigen Unsicherheit behaftet sind. Insbesondere kann also anhand von Plot 4 nicht darauf geschlossen werden, dass Guar für manche Konzentrationen scherverdickendes Verhalten zeigt. Da der Mechanismus, der bestimmt, ob ein Stoff scherverdünnende oder -dickende Eigenschaften hat, prinzipiell für alle Konzentrationen derselbe ist (bei Polymeren wie Guarán: „Verhaken“ der langkettigen Moleküle in der Lösung), muss auch eine 0.5% ige Guar-Wasser-Lösung eindeutig scherverdünnende Eigenschaften haben und das erläuterte Verhalten bei $c = 0.25\%, 0.5\%$ auf systematische Messfehler zurückzuführen sein (siehe dazu Abschnitt 4.2.3).

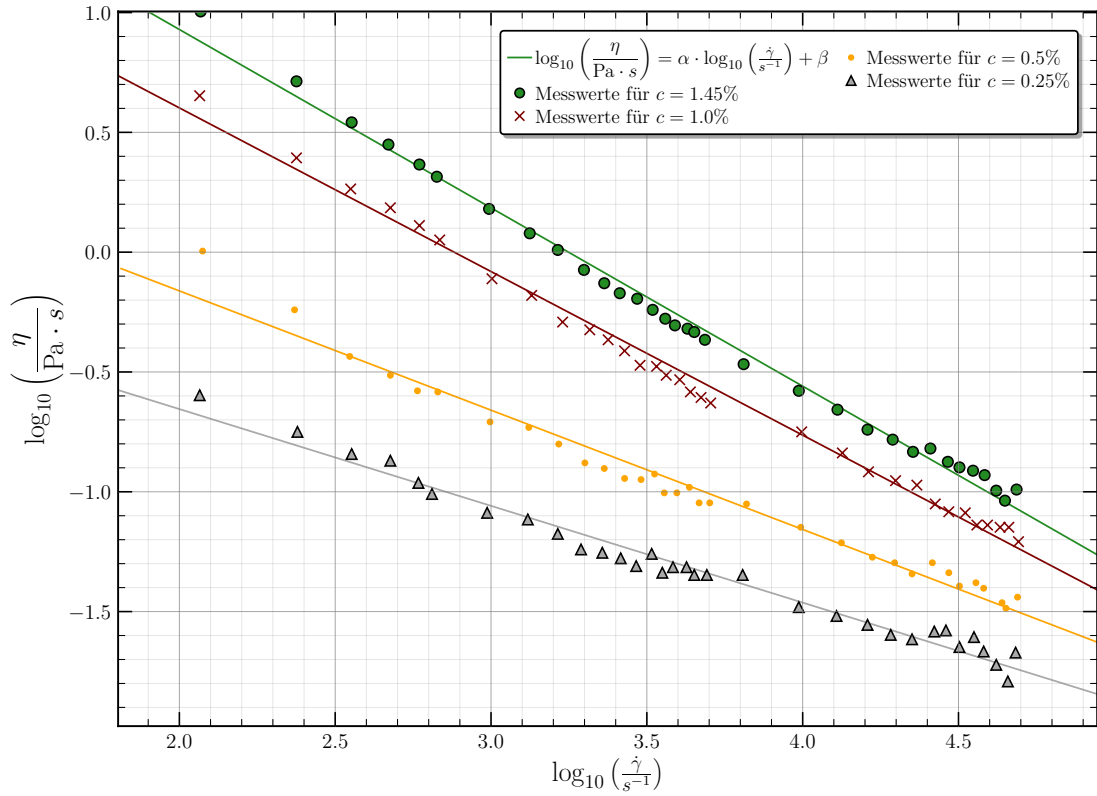
Weiterhin muss angemerkt werden, dass Wasser als Standardbeispiel für ein Newtonsches Fluid eigentlich eine scherratenunabhängige Viskosität haben müsste. Erklärungsansätze, warum dennoch scherverdünnendes Verhalten beobachtet wurde, wurden bereits in Abschnitt 4.1.1 gefunden.

Für $c = [1.0, 1.4, 2.0, 2.3]\%$ entspricht das beobachtete Verhalten der Erwartung, dass Guarán in Wasserlösung ein scherverdünnendes Fluid ist. Die Potenzabhängigkeit ist also von der Form

$$\eta \propto \dot{\gamma}^{\alpha} \quad (10)$$

mit $\alpha \in [-0.51 \pm 0.03, -0.68 \pm 0.02, -0.79 \pm 0.02, -0.80 \pm 0.02]$. Die Güte und Aussagekraft dieser Werte ist hoch; lediglich eine Verschiebung dieser Werte durch systematische Fehlereinflüsse ist denkbar. Diese werden in Abschnitt 4.2.3 eingeschätzt. Für die drei niedrigsten Konzentrationen hingegen ist aus den oben erläuterten Gründen ein abschließendes Festhalten des Fitparameters α zur Bestimmung der Potenzgesetz-Beziehung nicht sinnvoll.

In [11] wurden ebenfalls Messungen zur Scherratenabhängigkeit von der Viskosität vorgenommen. Abbildung 8 aus diesem Paper können Messdaten für Guarán-Wasser-Lösungen der Konzentrationen $0.25\%, 0.5\%, 1.0\%, 1.45\%$ entnommen werden. Diese Daten können wiederum logarithmisch aufgetragen und linear gefittet werden. Man erhält Plot 5 :



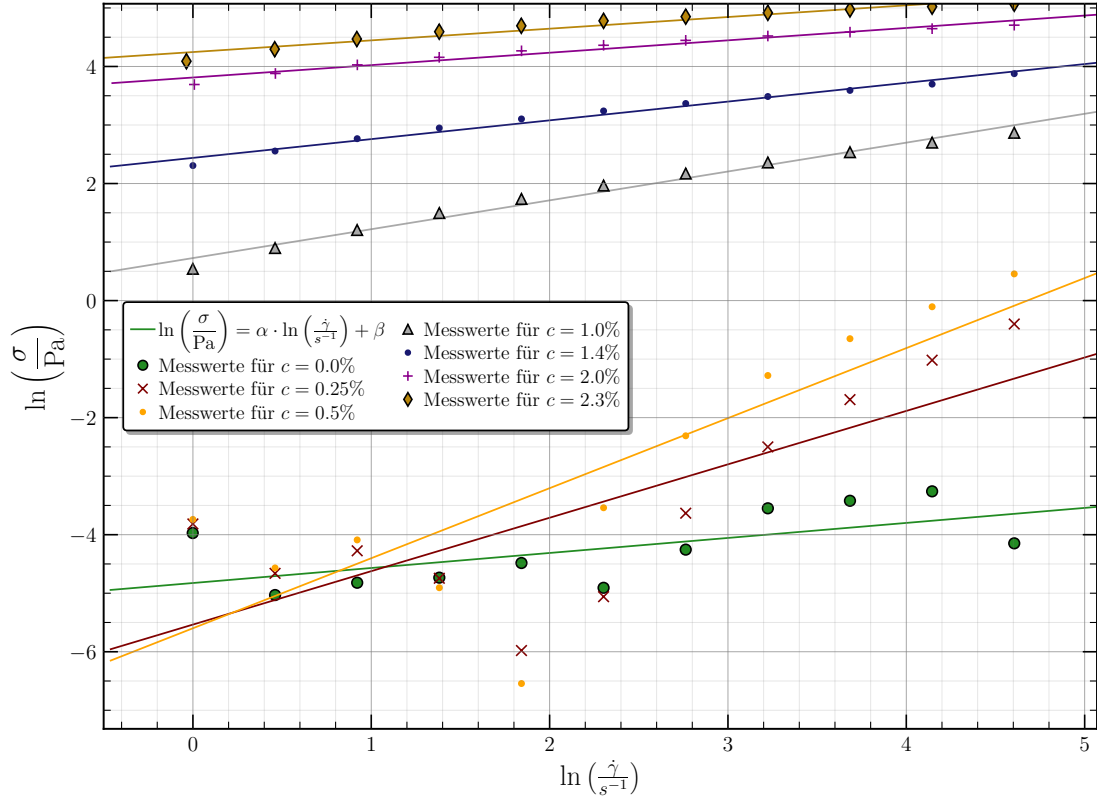
	$c = 1.45\%$	$c = 1.0\%$	$c = 0.5\%$	$c = 0.25\%$
α	-0.7443 ± 0.011	-0.683 ± 0.011	-0.4978 ± 0.014	-0.4038 ± 0.011
β	2.418 ± 0.04	1.9681 ± 0.039	0.834 ± 0.052	0.153 ± 0.04

Plot 5 Doppelt logarithmische Auftragung von η gegen $\dot{\gamma}$ mit Messwerten aus [11]

Zunächst fällt die qualitative Überlegenheit in der Güte dieser Daten insbesondere bei niedrigen Konzentrationen gegenüber den im Rahmen dieses Versuchs aufgenommenen Messwerten auf. Für die Konzentrationen $c = 0.25\%$, 0.5% ist ein Vergleich der Regressionsparameter aus Plot 5 und Plot 4 nicht sinnvoll. Für die einprozentige Lösung fällt auf, dass die beiden Fitparameter α nicht miteinander verträglich sind. Im Betrage ist das α aus Plot 5 größer. Wie schon in Abschnitt erwähnt, ist es wahrscheinlich, dass sich bei dieser Probe das Guarán nicht vollständig im Wasser lösen konnte, da sich beim Anmischen der Lösung kleine Klumpen gebildet haben. Dies würde bedeuten, dass faktisch eine Konzentration $< 1\%$ untersucht wurde, was impliziert, dass der Fitparameter α , der für höhere Konzentrationen klarerweise im Betrage größer wird, im Betrage zu klein gemessen wurde. Für die Konzentration 1.45% in Plot 5 gibt es kein exaktes Gegenstück in Plot 4. Es kann lediglich festgehalten werden, dass für die höhere Konzentration ein größeres $|\alpha|$ bestimmt wurde. Da die Konzentration von 1.4% , wie später anhand von Plot 7 noch erläutert wird, in einem Konzentrationsbereich liegt,

in dem kleine Änderungen der Konzentration große Änderungen in der Viskosität nach sich ziehen, erscheint es auch plausibel, dass die beiden α nicht nahezu identisch sind, obwohl die Konzentrationen nahezu gleich sind.

Zuletzt kann der Scherstress gegen die Scherrate aufgetragen werden. Plot 6 enthält aber im Vergleich zu Plot 4 keinerlei neue Information, da die vom Rheometer ausgegebenen Messwerte für σ und η beide aus dem gemessenen Drehmoment berechnet wurden und zwischen ihnen die Abhängigkeit $\sigma = \dot{\gamma} \cdot \eta$ gilt.



	$c = 0.0\%$	$c = 0.25\%$	$c = 0.5\%$	$c = 1.0\%$	$c = 1.4\%$	$c = 2.0\%$	$c = 2.3\%$
α	0.257 ± 0.11	0.913 ± 0.25	1.197 ± 0.28	0.493 ± 0.021	0.3206 ± 0.014	0.2117 ± 0.014	0.1996 ± 0.017
β	-4.826 ± 0.29	-5.536 ± 0.67	-5.599 ± 0.76	0.7265 ± 0.059	2.4383 ± 0.039	3.8115 ± 0.037	4.2465 ± 0.045

Plot 6 Doppelt logarithmische Auftragung von σ gegen $\dot{\gamma}$ bei Guarane

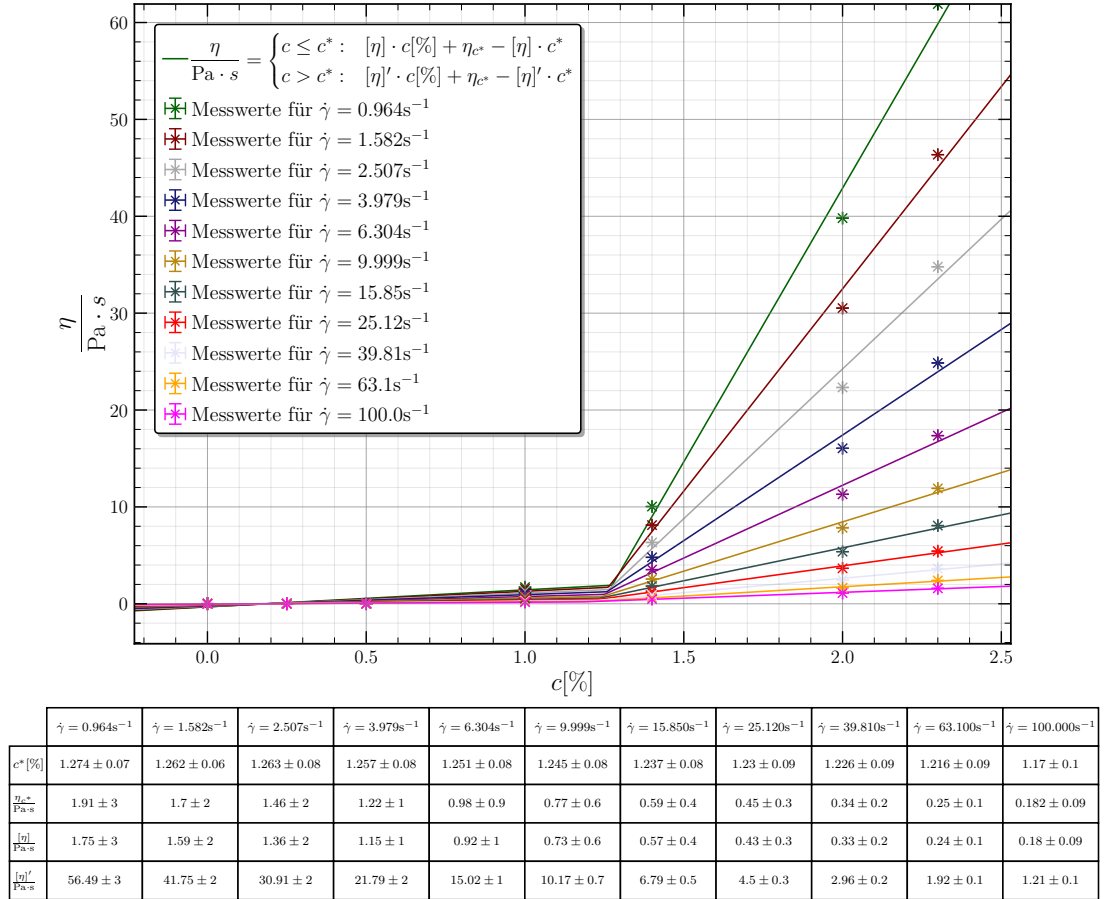
Entsprechend dieser Abhängigkeit gilt für die Parameter α_σ und α_η aus Plot 6 bzw. Plot 4 numerisch exakt $\alpha_\sigma - \alpha_\eta = 1$. Da $0 < \alpha_\sigma < 1$ kann erneut bestätigt werden, dass scherverdünnendes Verhalten vorliegt.

Schon rein visuell fällt in Plot 4 auf, dass für die Viskositäten zwischen den Konzentrationen $c = 1.0\%$ und $c = 1.4\%$ gemessen an der kleinen Konzentrationsdifferenz ein recht großer Sprung in der Viskosität zu beobachten ist. Und tatsächlich modelliert man

die Abhängigkeit der Viskosität von der Konzentration bei Polymerlösungen häufig wie folgt:

$$\eta(c) = \begin{cases} c \leq c^* : & [\eta] \cdot (c - c^*) + \eta_{c^*} \\ c > c^* : & [\eta]' \cdot (c - c^*) + \eta_{c^*} \end{cases} \quad (11)$$

Für eine feste Scherrate kann somit durch Variation der Parameter $([\eta], [\eta]', c^*, \eta_{c^*})$ ein Fit der Daten vorgenommen werden. Es ergibt sich der folgende Plot:



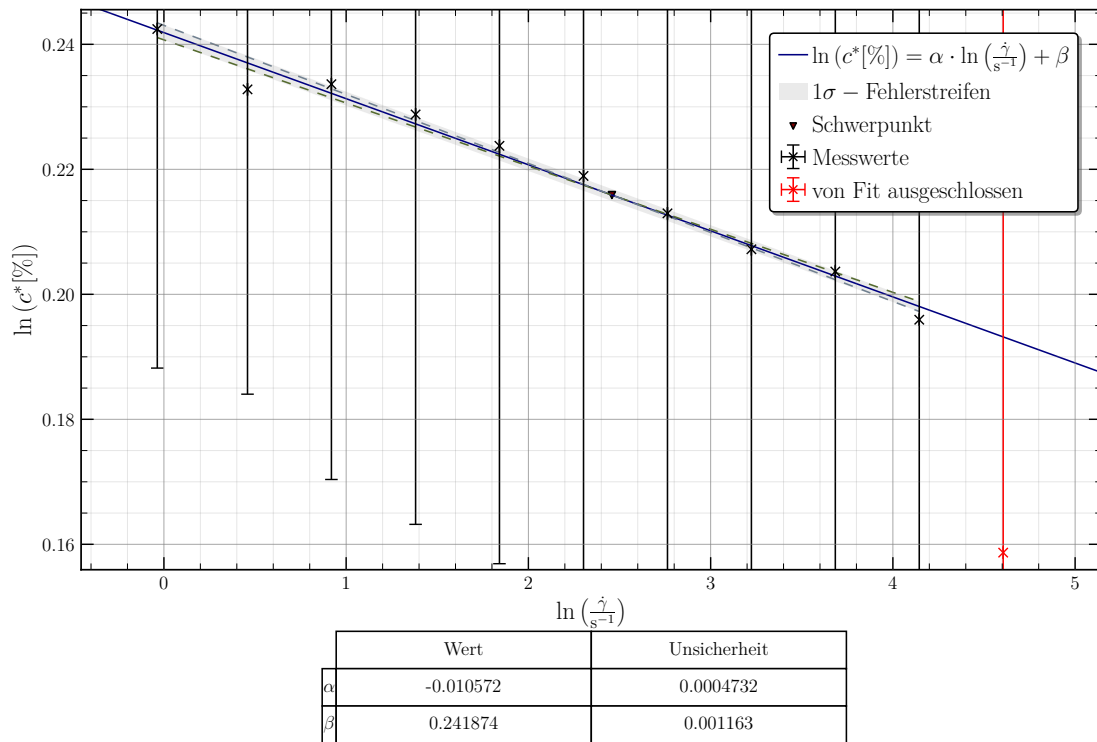
Plot 7 Auftragung von η gegen c bei Guarán

In der Appendix A.2 sind für jede Scherrate dieselben Daten nochmals in einzelnen Figures aufgetragen, um die Übersichtlichkeit zu verbessern. Qualitativ kann festgehalten werden, dass das verwendete Modell die Messdaten gut zu beschreiben vermag, also tatsächlich eine Konzentration c^* existiert, ab der der Anstieg der Viskosität mit der Konzentration schneller wird.

Die Güte der Fits mag überraschend sein, da bei der Betrachtung der Viskosität als Funktion der Scherrate zumindest für zwei Konzentrationen äußerst unzufriedenstellende Messwerte aufgenommen wurden. Da aber für jeden Fit $\dot{\gamma}$ fest ist wird, haben wir bei

jedem der 11 Fits in Plot 7 mindestens vier Messwerte mit guter Aussagekraft, sodass diese den Einfluss der beobachteten Abweichung der zwei bis drei anderen Messwerte abschwächen und zu einer relativ hohen Aussagekraft der Fitparameter führen.

Ein Blick auf die Fitparameter zeigt, dass c^* monoton mit der Scherrate $\dot{\gamma}$ abzunehmen scheint. Tatsächlich zeigt sich in einer doppelt logarithmischen Darstellung der kritischen Konzentration gegen die Scherrate ein klarer linearer Trend (\rightarrow Plot 8). Beim Wert zu $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ handelt es sich um einen statistischen Ausreißer, der deshalb nicht bei der Regression berücksichtigt wurde. Ein Berücksichtigen dieses Messwertes hätte zu einer Verschlechterung in der Beschreibung des ansonsten eindeutig linearen Zusammenhangs geführt.



Plot 8 Doppelt logarithmische Auftragung von c^* gegen $\dot{\gamma}$ bei Guaran

In der Tat erscheint es plausibel, dass ein Potenzgesetz zwischen der kritischen Konzentration und der Scherrate vorliegt: Die Viskosität nimmt gemäß eines Potenzgesetzes mit der Scherrate ab. Das heißt auch, dass die Kurven in Plot 7 für festes c gemäß

$$\frac{\dot{\gamma}_1}{\dot{\gamma}_2} = \frac{\eta_1^{\alpha(c)}}{\eta_2^{\alpha(c)}} \quad (12)$$

ineinander überführt werden können. Stellt man sich nun eine Kurve (η, c) für festes $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_2$ vor und möchte diese in eine Kurve mit $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 > \dot{\gamma}_2$ überführen, so gilt $\eta_1 =$

$\left(\frac{\dot{\gamma}_1}{\dot{\gamma}_2}\right)^{1/\alpha(c)} \cdot \eta_2$. Nun kann man Plot 4 entnehmen, dass $|\alpha|$ für größere Konzentrationen zunimmt. Das bedeutet auch, dass die η -Werte für kleinere c (relativ gesehen) weniger gestaucht werden als die Werte mit größerer c . Damit flacht die Kurve $\eta(c)|_{\dot{\gamma}_1}$ im Vergleich zur Kurve $\eta(c)|_{\dot{\gamma}_2}$ ab, und insbesondere wird der Punkt der kritischen Konzentration nach links verschoben (zu kleineren c). Für die konkrete Form des Potenzgesetzes, wie c^* von $\dot{\gamma}$ abhängt, kommt es nun auf die konkrete Form der Abhängigkeit $\alpha(c)$ an. Klar ist aber, dass zwischen c^* und $\dot{\gamma}$ ein Potenzzusammenhang gelten muss.

Da also, wie gerade dargelegt, die kritische Konzentration nicht nur eine Stoffeigenschaft ist, sondern auch von der Scherrate abhängt, ist es nicht sinnvoll, abschließend *eine* kritische Konzentration oder Überlappungskonzentration für Guaran-Wasser-Lösungen festzuhalten. Stattdessen bemerken wir, dass der folgende funktionale Zusammenhang empirisch gefunden wurde:

$$c^*[\%] = e^{0.242 \pm 0.002} \cdot \dot{\gamma}^{-0.0106 \pm 0.0005} \quad (13)$$

Wir haben keinen Wert in der Literatur gefunden, mit dem dieses Ergebnis sinnvoll verglichen werden könnte. Dies könnte darin begründet liegen, dass die Abhängigkeit c^* von $\dot{\gamma}$ ein Artefakt einer unzulänglichen Versuchsdurchführung sein könnte und die kritische Konzentration c^* möglicherweise eigentlich eine Konstante ist, die nur vom gelösten Stoff abhängt. Gestützt wird dies dadurch, dass der Exponent im bestimmten Potenzgesetz nahe 0 ist.

4.2.2. Fehlerabschätzung zum Anmischen der Lösungen

Analog zu den Überlegungen in Abschnitt 4.1.2 können die Unsicherheiten für die Konzentrationen bei den Guaran-Lösungen abgeschätzt werden. Man erhält:

$c[\%]$ -Soll	$V_{H_2O}[\mu l]$	$m[g]$	$c = \frac{m}{\rho \cdot V + m}[\%]$	$\Delta c[\%]$	$\frac{\Delta c}{c}[\%]$
0.25	1189	0.00298	0.2507	0.01680	6.6984
0.5	1465	0.00736	0.5013	0.01359	2.7113
1	1096	0.01107	1.0029	0.01809	1.8038
1.4	1158	0.01644	1.4039	0.01714	1.2205
2	963	0.01964	2.0045	0.02063	1.0291
2.3	1078	0.02537	2.3060	0.01856	0.8047

Man erkennt, dass die relativen Fehler in der Konzentration sehr klein werden für größere Konzentrationen. Die Konzentrationen hatten also im Rahmen der geringen Messunsicherheit die Soll-Konzentration der jeweiligen Stoffe, sodass eine zu große oder zu kleine untersuchte Konzentration wegen ungenau abgemessener Massen oder Volumina zumindest bei Konzentrationen $\geq 1\%$ keine relevante Fehlerquelle ist. Für die kleinere Konzentrationen die Stoffkonzentration muss die Unsicherheit in der Stoffkonzentration jedoch prinzipiell als statistische Fehler berücksichtigt werden.

4.2.3. Fehlerbetrachtung Scherratenmessungen

Wie in im vorigen Abschnitt 4.2.1 bereits angemerkt, muss das beobachtete Verhalten bei $c = 0.25\%$, 0.5% auf systematische Messfehler zurückzuführen sein. Es sind folgende Fehlereinflüsse denkbar:

- Under- oder Overfilling: In besonderem Maße wurde bei dem Loaden des Samples bei den Guar-Messungen darauf geachtet, dass eine ausreichende Lösungsmenge aufgebracht wird, da stets ein Teil der mittels einer Pipette abgemessenen Menge in der Pipette zurückblieb. Hellström (2015) merkt an: „*Small changes in the radius of a rheometer sample can cause significant errors in the measured apparent viscosity*“ ([8]). Er empfiehlt ein Verfahren, bei dem mittels Bildgebung der reale Sample-Radius bestimmt wird, um auf diesen Fehler hin zu korrigieren. Dies ist auch bei dem hier verwendeten Setup leicht umzusetzen und verspricht erhebliche Verbesserungen in der Messgenauigkeit.
- Nicht-Konstanz der Sample-Temperatur während der Messung (vgl. dazu auch Abschnitt 4.1.1): Kleine Variationen in der Temperatur führen zu vernachlässigbaren Messfehlern. Bei den Saccharose-Messungen wurde jedoch schon die Beobachtung gemacht, dass - entgegen der Erwartung- die Saccharose-Lösungen und sogar die reine Wasserlösung scherverdünnendes Verhalten zeigen. Da die Temperatur nicht direkt am Sample gemessen wird (sonder in der Platte darunter), und da die Anfangstemperatur des Samples etwas 12 K unter der Soll-Temperatur während des Versuchs lag, bleibt die Frage offen, ob das Sample bei der ersten Scherrate für die bereits die Soll-Temperatur erreicht hatte. Würde sich die Temperatur des Samples im Verlauf der weiteren Messungen weiter erhöhen, würde ein verstärkt scherverdünnendes Verhalten beobachtet werden, da höhere Temperaturen zu einer Abnahme der Viskosität führen.
- (kleine) Luftblaseneinschlüsse im Sample, der beim Anmischen der Lösungen entstanden sein könnte: Stadler spekuliert, dass die wegen ihrer Oberflächenspannung sehr elastischen Luftblasen bei Elastizitätsmessungen deformiert werden und zu einer erhöhten Elastizitätsmessung führen ([6]). Analoge Überlegungen könnten nahelegen, dass Luftblaseneinschlüsse zu einer geringeren Viskosität führen, da die Luftblasen lokal des Zusammenhalt der Polymermoleküle schwächen würden. Denkbar ist auch, dass sich bei einer gewissen Scherrate zwei eingeschlossene Luftblasen vereinigen, da sie sich durch die Deformation näher kommen. Ein solches Vereinigen könnte zu einem unstetigen Verhalten bei der Viskositätsmessung führen. Die Bewegung von Luftblasen in Flüssigkeiten ist hydrodynamisch jedoch sehr komplex, sodass der konkrete Einfluss schwer abzuschätzen ist. Klar ist jedoch, dass Luftblaseneinschlüsse im Sample, wie sie beim Schütteln des Samples oder dem Pipettieren entstanden sein könnten, als wahrscheinlich eingestuft werden müssen.
- nicht vollständig gelöstes Guaran-Pulver, das ausklumpt: Solche Klumpen würden eine Inhomogenität in der Lösung bedeuten, die lokal die Viskosität (stark) erhöht. Insgesamt wäre die gelöste Pulvermenge durch solche Klumpen verringert, da das

Pulver innerhalb der Klumpen natürlich nicht gelöst werden kann. Das Auftreten solcher Klumpen steht außer Frage, jedoch wurden sie stets so weit ausgemerzt, bis keine mehr mit bloßem Auge sichtbar waren. Bei der 1%igen Lösung sind solche Einflüsse wegen Schwierigkeiten beim Anmischen wahrscheinlich. Dort ist jedoch im Gegensatz zu den Lösungen mit $c = 0.25\%, 0.5\%$ ein klar linearer Zusammenhang erkennbar, weshalb Klumpenbildung vermutlich nicht alleine das Verhalten bei den besagten zwei Konzentrationen erklären kann.

- Erschütterungen im Raum während der Versuchsdurchführung: Einflüsse dadurch sind wegen der hohen Genauigkeit bei der Drehmomentbestimmung prinzipiell möglich, beispielsweise wenn die Tür rapide zugezogen werden würde. Äußern würde es sich durch einzelne Messausreißer.
Für die Messungen mit $c = 0.25\%, 0.5\%$ kann ein solcher Einfluss nicht als Erklärung herangezogen werden, da die beiden Messungen in dem Sinn korreliert erscheinen, dass sie das gleiche qualitative Verhalten (aus zwei nach unten gerichteten Hyperbeln zu bestehen) zeigen.
- Falschalignment der Geometry (vgl. dazu [6]): Wurde die Geometry in der Vergangenheit einmal fallen gelassen oder hat sie sich anderweitig deformiert, ist es denkbar, dass die beiden Platten nicht mehr parallel sind. Dies würde den Plattenabstand (Gap) verändern, was die ausgegebenen Scherraten wegen $\dot{\gamma} \propto d^{-1}$ systematisch verfälschen würde. Da das verwendete Rheometer jedoch häufig in Benutzung ist, ist es wahrscheinlich, dass solche Veränderungen sehr frühzeitig bemerkt werden würden und deshalb der Einfluss von dadurch induzierten Fehlern als unwahrscheinlich einzuschätzen.

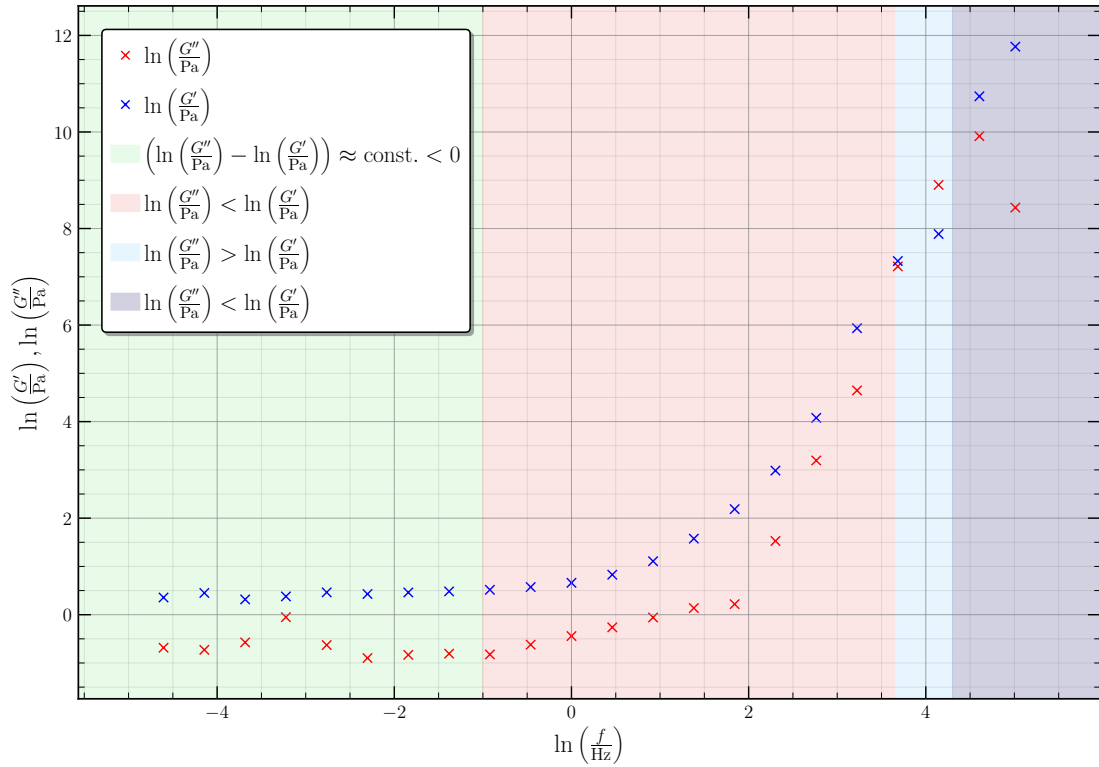
Außerdem gilt weiterhin die Bemerkung aus Abschnitt 2.4, dass prinzipiell der relative Fehler bei der Viskositätsbestimmung für kleiner Viskositäten und somit kleinere Stoffkonzentrationen größer ist. Dies zusammen mit der Nicht-Konstanz der Temperatur und der Gefahr von Under- oder Overfilling sind als die wahrscheinlichsten Fehlereinflüsse zu nennen. Zuletzt sei folgende Bemerkung von Stadler ([6]) erwähnt, wonach ein erheblicher Anteil der beobachteten Anomalitäten auf falsche Anwendung seitens des Benutzers zurückzuführen sind:

„many inexperienced users obtain data, which is significantly error afflicted in nontrivial ways“

Denkbar hier sind das unzureichende Reinigen der Platten am Rheometer vor dem Laden des Samples oder sonstige Flüchtigkeitsfehler.

4.2.4. Frequenzversuch

Trägt man das Speicher- bzw. Verlustmodul doppellogarithmisch gegen die Oszillationsfrequenz auf, erhält man den folgenden Plot, in dem Frequenzbereiche, die qualitativ unterschiedliches Verhalten zeigen, durch farbliche Untermalung hervorgehoben sind (die Grenzen der Bereiche sind nicht als scharf zu sehen, da sie nur „per Augenmaß“ eingezeichnet wurden):



Plot 9 Doppelt logarithmische Auftragung von G' , G'' gegen die Frequenz f bei Guaran

Es zeigt sich, dass für kleine Frequenzen sowohl das Speicher- als auch das Verlustmodul in sehr guter Näherung konstant sind, wobei das Speichermodul größer ist als das Verlustmodul (grün hinterlegt). In Abbildung 5 kann dies der Rubbery Plateau Region zugeordnet werden, in der sich der Stoff gelartig verhält.

Im sich anschließenden rot hinterlegten Bereich nehmen die viskosen Anteile weiter zu, bis sich das Speicher- und das Verlustmodul bei $f^* \approx 40$ Hz kreuzen. Für einen kurzen Frequenzbereich (hellblau hinterlegt) dominiert das Verlustmodul gegenüber dem Speichermodul. Dieser Bereich kann der Transition Region in Abbildung 5 zugeordnet werden. In diesem Bereich wäre eine höhere Messwertdichte wünschenswert, um eine definitivere Aussage darüber treffen zu können, in welchem Bereich $G'' > G'$ ist. Anschließend nimmt das Speichermodul weiter zu und das Verlustmodul ab, sodass $G'' > G'$ (dunkelblau hinterlegt). Gemäß Abbildung 5 ist für noch höhere Frequenzen ein Abflachen von G' und Abnehmen von G'' zu erwarten. Es wäre schön, noch weitere Messwerte zu sehen, um das Verhalten, das vermutlich der Glossy Region zugeordnet werden kann, weiter zu beleuchten.

Ferner konnte für keinen Frequenzbereich ein Verhalten wie in der Terminal Region beobachtet werden. Es ist möglich, dass für kleinere Frequenzen ($\lesssim 0.01$ Hz) als im betrachteten Messbereich ein solches auftreten würde.

Insgesamt konnten also drei der vier Regionen, die im viskoelastischen Spektrum einer

Polymerlösung zu erwarten sind, bei der Analyse der 0.5%igen Guaran-Wasser-Lösung beobachtet werden.

4.2.5. Fehlerbetrachtung Frequenzversuch

Da die Beobachtungen, die zum Frequenzversuch gemacht wurden, nur qualitativer Natur sind, ist der Einfluss von systematischen Fehlern als äußerst gering einzustufen. Eine von der Soll-Temperatur verschiedene Temperatur würde die Breite und Höhe der einzelnen viskoelastischen Bereiche verändern, aber nichts an deren qualitativen Natur ändern. Selbst eine sich zeitlich (monoton) ändernde Temperatur des Samples, wie in Abschnitt 4.1.1 diskutiert, würde den qualitativen Verlauf kaum ändern, sondern nur zu einer Stauchung entlang der Abszisse und auch Ordinate führen und damit zwar u.U. das Bestimmen von f^* systematisch verfälschen, aber an der prinzipiellen Abfolge der viskoelastischen Bereiche nichts ändern. Der Einfluss durch Temperaturvariation ist jedoch (im Gegensatz zu den Messungen mit Saccharose) ohnehin als unerheblich einzustufen, da die 0.5%ige Lösung wegen der zuvor mit ihr vorgenommenen Messungen schon lange vor dem Beginn der eigentlichen Oszillationsmessung auf das Rheometer gegeben wurde, also auf jeden Fall genug Zeit hatte, die Temperatur Soll-Temperatur von 25°C anzunehmen.

Auch der Einfluss eines Underfills wäre nur gering, da dadurch die elastischen und viskosen Eigenschaften gleichermaßen als zu gering gemessen worden wären, der Graph dadurch also nur entlang der Ordinate gestaucht werden würde.

Der größte Fehler bei der Bestimmung der einzelnen viskoelastischen Bereiche ist die recht grobe Auflösung in der Frequenz, da dadurch beispielsweise die Schnittpunkte vom Verlust- und vom Speichermodul nur äußerst grob abgeschätzt werden konnten. Es wäre sinnvoll, die Messpunkte pro Dekade bei einer Wiederholung des Versuchs zu Kosten einer etwas längeren Versuchsdurchführung auf einen Wert > 5 zu setzen. Auch ist es empfehlenswert, den Messbereich selbst zu vergrößern. Bei einigen hundert Hz maximaler Messfrequenz mehr könnte die Glossy Region deutlich detaillierter beleuchtet werden. Änderte man zudem die minimale Messfrequenz auf einen kleineren Wert, ist es denkbar, dass die Terminal Region noch zu beobachten wäre.

5. Zusammenfassung

Das beobachtete Verhalten, wonach die Saccharoselösungen scheinbar scherverdünnendes Verhalten zeigen, kann über eine systematische Verfälschung der Messwerte durch ein Ansteigen der Temperatur während des Messprozesses plausibel erklärt werden. Leider gelang es deshalb nicht, abschließend zuverlässige Werte für die Viskositäten von den Saccharoselösungen oder einen Wert für die intrinsische Viskosität von Saccharose festzuhalten. Ein ausschlaggebender Fehlereinfluss hierfür war, selbst nachdem die Temperaturfehler durch ausschließliches Berücksichtigen der Messwerte für hohe Scherraten, mit großer Sicherheit ein Underfilling. Wegen des ausdrücklichen Hinweises seitens des Betreuers, bei den Guaran-Lösungen lieber etwas zu viel als zu wenig Probe ins Rheometer zu geben, wurde war Underfilling wahrscheinlich bei den Guaran-Messungen ein geringerer Einflussfaktor als bei den Saccharose-Messungen. Mit der im Versuchsverlauf gewonnenen Erfahrung der Versuchsdurchführenden wäre ein Wiederholen der Saccharose-Messungen sinnvoll. Die dann gewonnenen Daten würden mit Sicherheit bestätigen, dass sich Saccharoselösungen in der Tat als Newtonsche Flüssigkeiten verhalten, und ferner zulassen, die (intrinsische) Viskosität von Saccharose-Wasser-Lösungen genau zu bestimmen.

Es gelingt uns nicht, eine zufriedenstellende Erklärung für die Messwerte bei den Konzentrationen $c = 0.25\%, 0.5\%$ zu finden. Ein Wiederholen dieser Messungen wird ausdrücklich empfohlen, um zu prüfen, ob das beobachtete Verhalten reproduzierbar ist. Zu erwarten ist jedoch, dass sich bei einer Wiederholung „schönere“ Werte ergeben würden, die erstens stützen, dass auch bei diesen Konzentrationen zwischen der Viskosität und der Scherrate ein Potenzgesetzzusammenhang gilt, und zweitens, das Guaran-Wasser-Lösungen für beliebige Konzentrationen scherverdünnend sind.

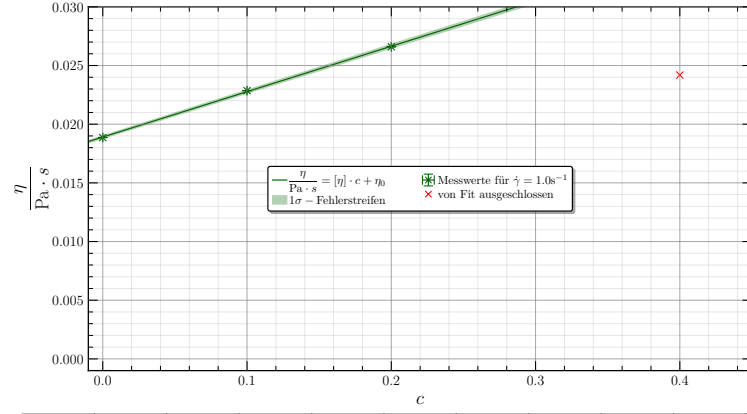
Weiterhin empfehlen wir eine Versuchsdurchführung in einem wärmeren Raum. Wahrscheinlich würde dann kein scherverdünnendes Verhalten bei den Saccharose-Lösungen beobachtet werden, was im Widerspruch zur Erwartung und dem Konsens in der einschlägigen Literatur stand.

Literatur

- [1] Autor unbekannt, “Praktikumsversuch Rheologie Bachelor.” [Online unter <https://www.softmatter.physik.uni-muenchen.de/teaching/fortgeschrittenenpraktikum/r3-rheologie/fpraktikumrheologiebdeutsch.pdf>; Stand 03. Dezember 2022].
- [2] Wikipedia, “Potenzgesetz (Flüssigkeit).” [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Potenzgesetz_\(Fl%C3%BCssigkeit\)&oldid=192899581](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Potenzgesetz_(Fl%C3%BCssigkeit)&oldid=192899581), 2019. [Online; Stand 3. Dezember 2022].
- [3] Malvern, “Kinexus series user manual,” Jan 2014. [Online unter <https://www.equipx.net/uploads/Malvern%20Instruments/MalvernKinexus-usermanual.pdf>, Stand 08.12.2022].
- [4] Malvern, “Kinexus Brochure,” 2017. [Online unter https://www.malvernpanalytical.com/de/assets/MRK1089-06-DE_Kinexus_Brochure_LRA4-tcm57-17219.pdf, Stand 08.12.2022].
- [5] P. Först, “In-situ Untersuchungen der Viskosität fluider, komprimierter Lebensmittel-Modellsysteme,” 2001.
- [6] F. J. Stadler, “What are typical sources of error in rotational rheometry of polymer melts?,” *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 26, pp. 277–291, Aug 2014.
- [7] V. Telis, J. Telis-Romero, H. Mazzotti, and A. Gabas, “Viscosity of Aqueous Carbohydrate Solutions at Different Temperatures and Concentrations,” *International Journal of Food Properties*, vol. 10, no. 1, pp. 185–195, 2007.
- [8] L. H. O. Hellström, M. A. Samaha, K. M. Wang, A. J. Smits, and M. Hultmark, “Errors in parallel-plate and cone-plate rheometer measurements due to sample underfill,” *Measurement Science and Technology*, vol. 26, p. 015301, nov 2014.
- [9] E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, M. O. McLinden, P. Linstrom, and W. Mallard, *Thermophysical Properties of Fluid Systems*. National Institute of Standards and Technology. [Online unter <https://doi.org/10.18434/T4D303>, Zugriff am 11.12.2022].
- [10] Wikipedia contributors, “Guar gum.” https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Guar_gum&oldid=1124053245, 2022. [Online; Zugriff am 08. Dezember 2022].
- [11] J. Kramer, J. T. Uhl, and R. K. Prud’Homme, “Measurement of the viscosity of guar gum solutions to 50,000 s⁻¹ using a parallel plate rheometer,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 27, no. 8, pp. 598–602, 1987.

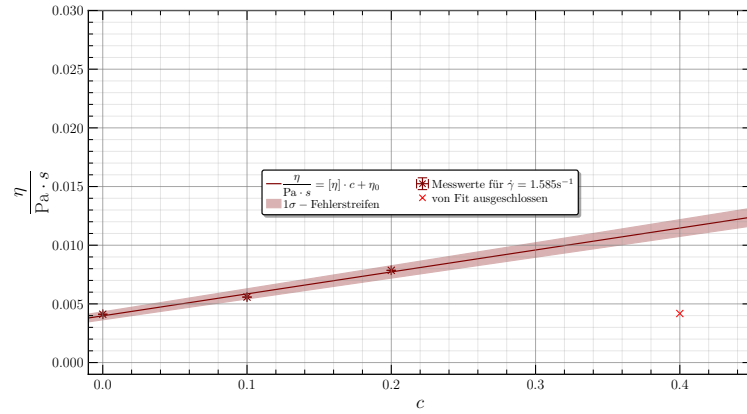
A. Ergänzende Plots

A.1. Bestimmung der Konzentrationsabhängigkeit zu Saccharose



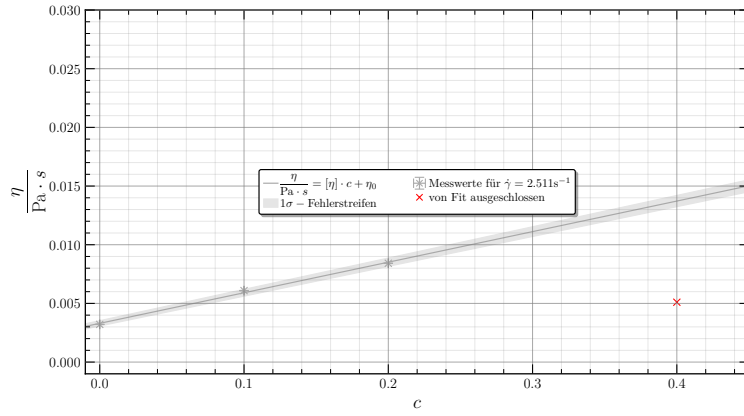
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 10 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 1



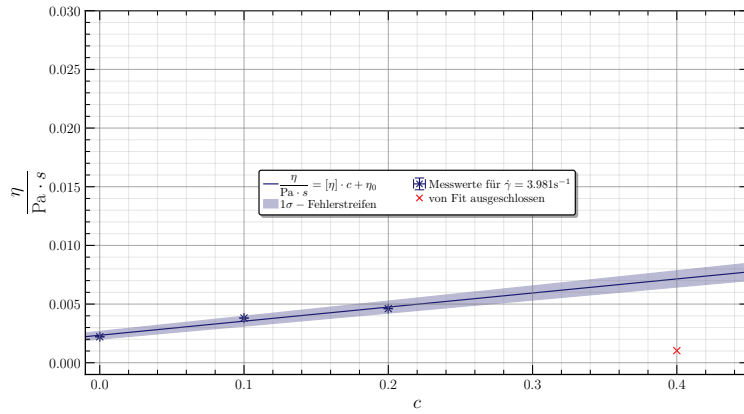
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 11 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 2



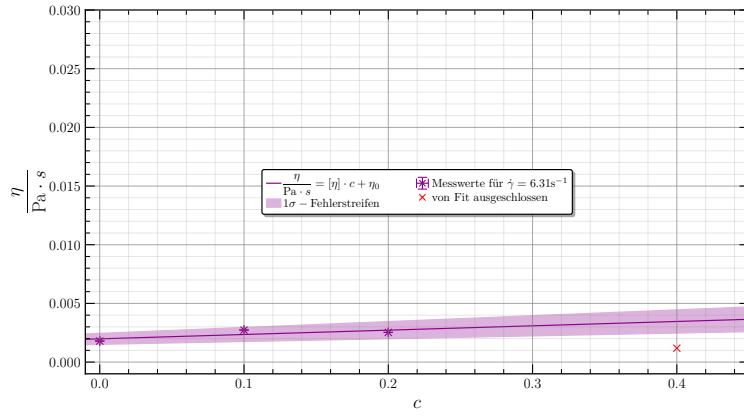
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 12 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 3



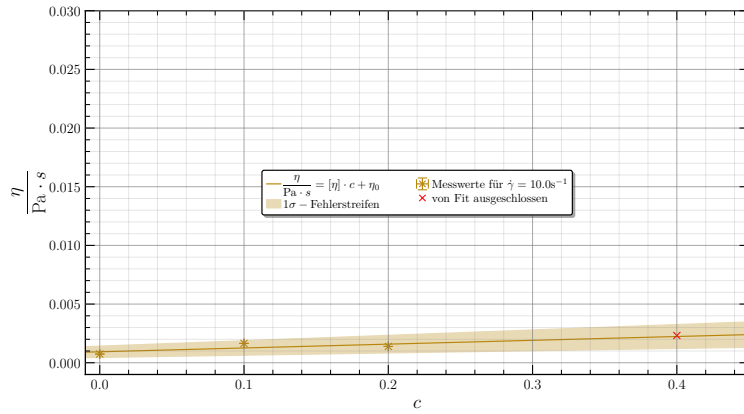
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 13 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 4



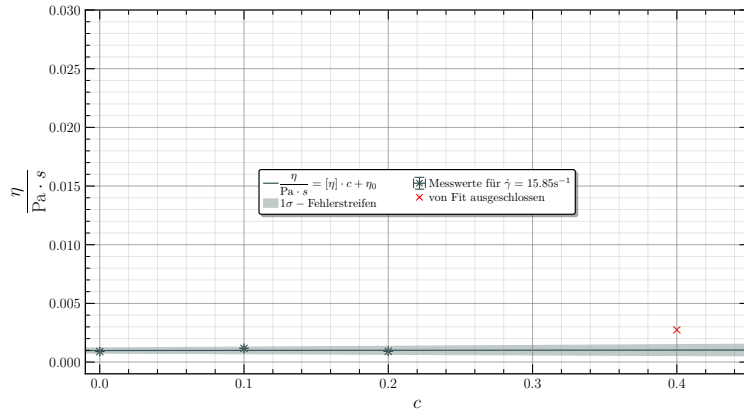
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{m}^3/\text{kg}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 14 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 5



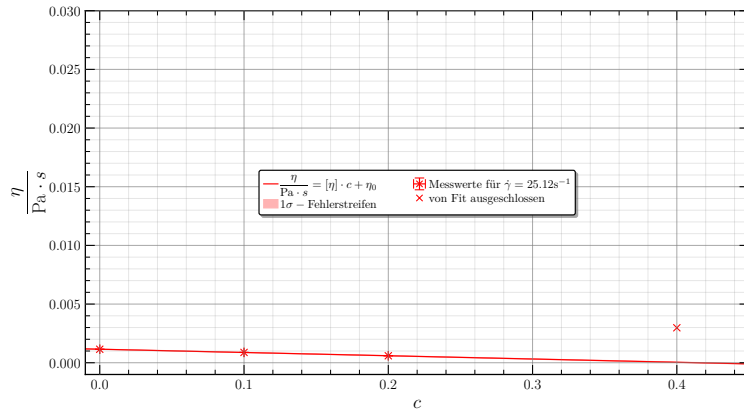
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{m}^3/\text{kg}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 15 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 6



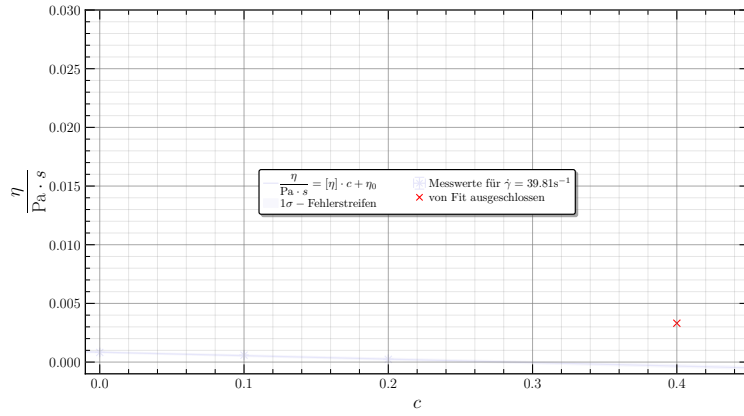
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mL/g}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 16 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 7



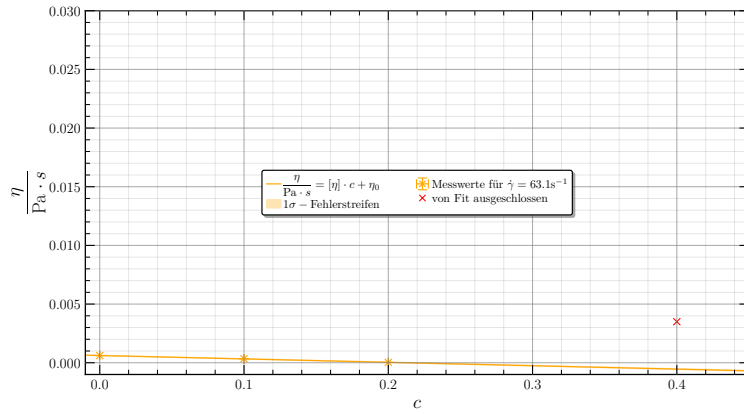
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mL/g}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 17 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 8



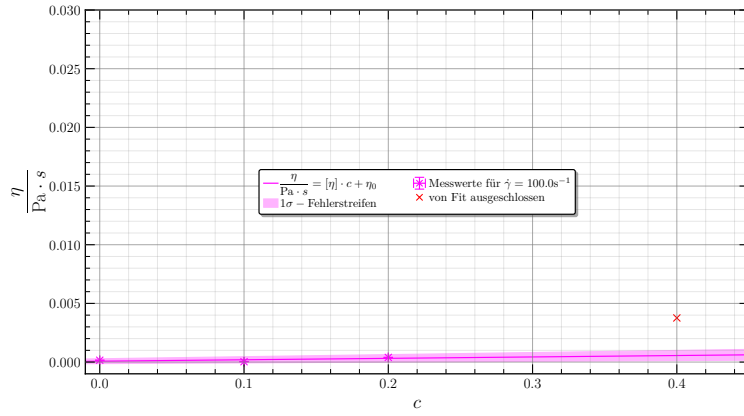
	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

Plot 18 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 9



	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

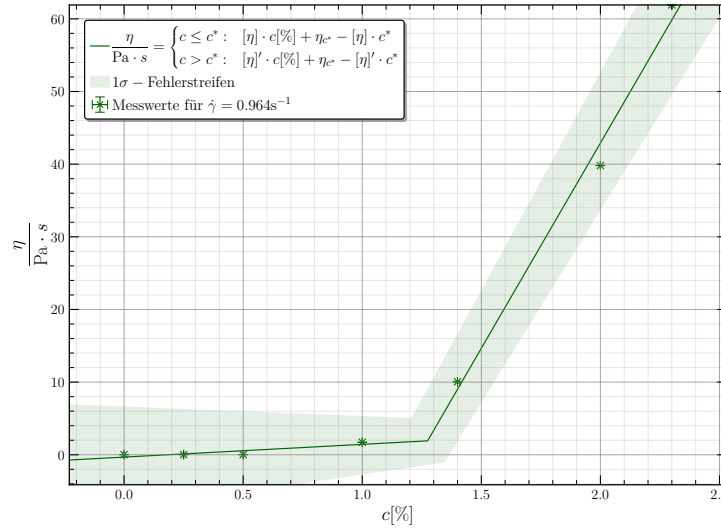
Plot 19 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 10



	$\dot{\gamma} = 1.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.585\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.511\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.981\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.310\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 10.000\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$\frac{[\eta]}{\text{mPa}}$	387.0 ± 7.5	187.0 ± 24	260.5 ± 16	120.0 ± 23	37.0 ± 33	32.55 ± 34	0.95 ± 15	-27.8 ± 0.52	-29.5 ± 3.6	-28.96 ± 1.2	12.05 ± 14
$\frac{\eta_0}{\text{mPa}}$	189.033 ± 0.97	39.83 ± 3.1	33.02 ± 2	23.43 ± 3	19.8 ± 4.2	9.34 ± 4.4	9.84 ± 2	11.53 ± 0.067	8.417 ± 0.46	6.162 ± 0.16	0.76 ± 1.8

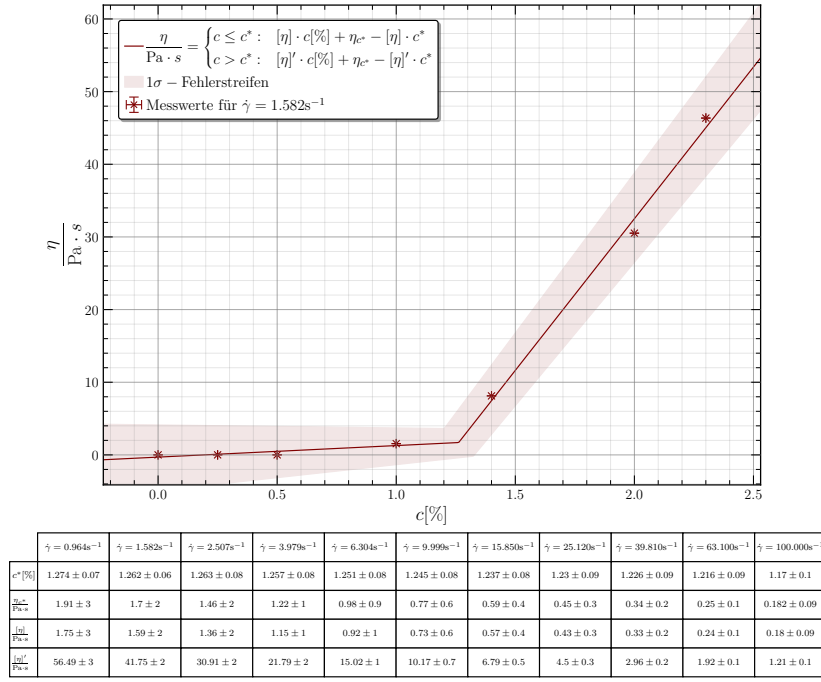
Plot 20 Auftragung von η gegen c bei Saccharose für Scherrate 11

A.2. Bestimmung der Überlappungskonzentration von Guaran

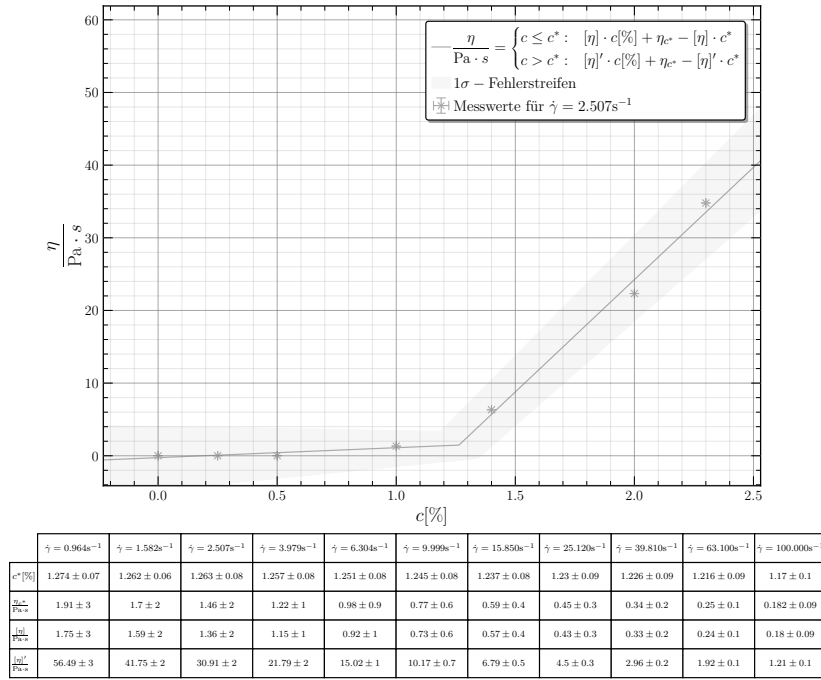


	$\dot{\gamma} = 0.964\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 1.582\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 2.507\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 3.979\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 6.304\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 9.999\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 15.850\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 25.120\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 39.810\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 63.100\text{s}^{-1}$	$\dot{\gamma} = 100.000\text{s}^{-1}$
$c^* [\%]$	1.274 ± 0.07	1.262 ± 0.06	1.263 ± 0.08	1.257 ± 0.08	1.251 ± 0.08	1.245 ± 0.08	1.237 ± 0.08	1.23 ± 0.09	1.226 ± 0.09	1.216 ± 0.09	1.17 ± 0.1
$\frac{\eta_0}{\text{Pa}}$	1.91 ± 3	1.7 ± 2	1.46 ± 2	1.22 ± 1	0.98 ± 0.9	0.77 ± 0.6	0.59 ± 0.4	0.45 ± 0.3	0.34 ± 0.2	0.25 ± 0.1	0.182 ± 0.09
$\frac{[\eta]}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$	1.75 ± 3	1.59 ± 2	1.36 ± 2	1.15 ± 1	0.92 ± 1	0.73 ± 0.6	0.57 ± 0.4	0.43 ± 0.3	0.33 ± 0.2	0.24 ± 0.1	0.18 ± 0.09
$\frac{[\eta]'}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$	56.49 ± 3	41.75 ± 2	30.91 ± 2	21.79 ± 2	15.02 ± 1	10.17 ± 0.7	6.79 ± 0.5	4.5 ± 0.3	2.96 ± 0.2	1.92 ± 0.1	1.21 ± 0.1

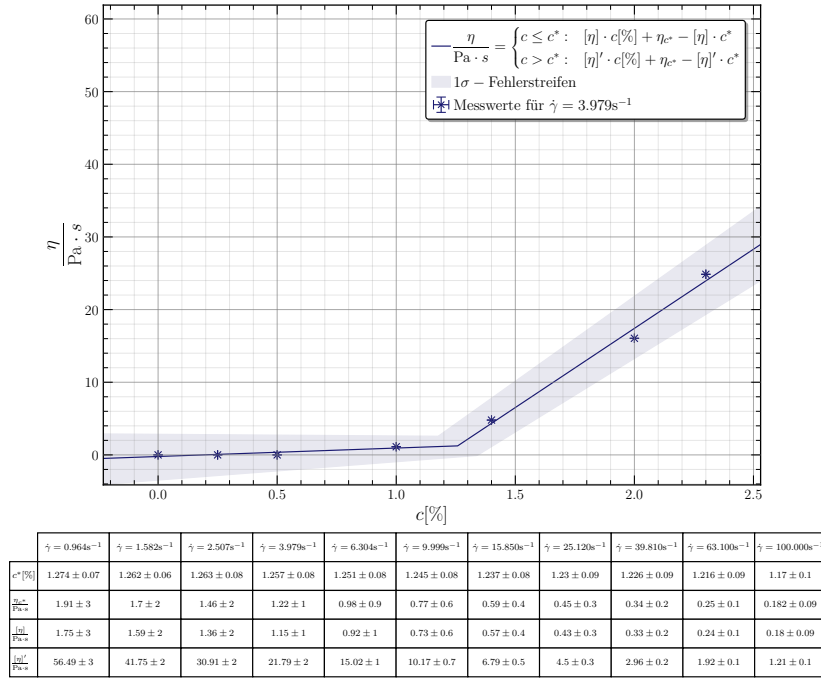
Plot 21 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 1



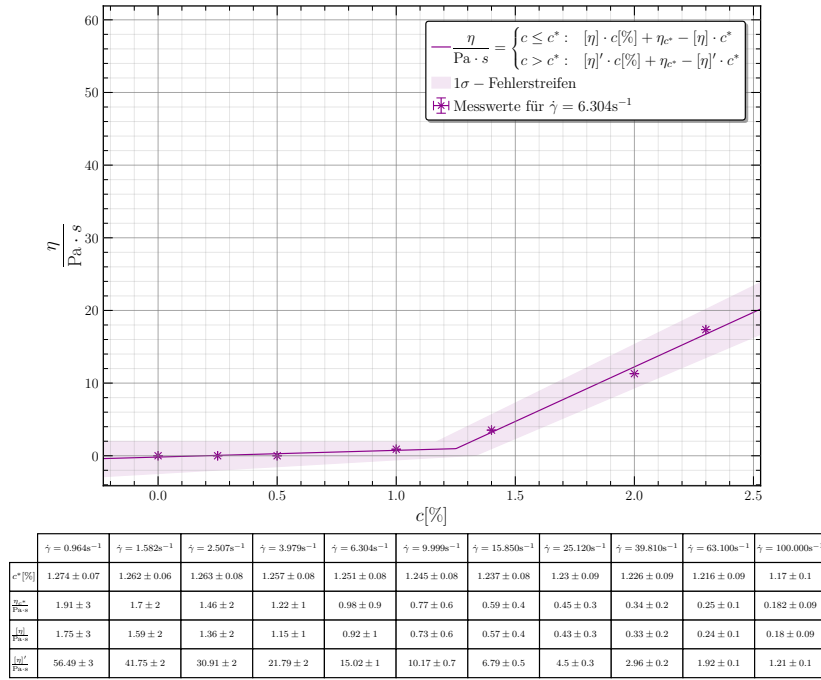
Plot 22 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 2



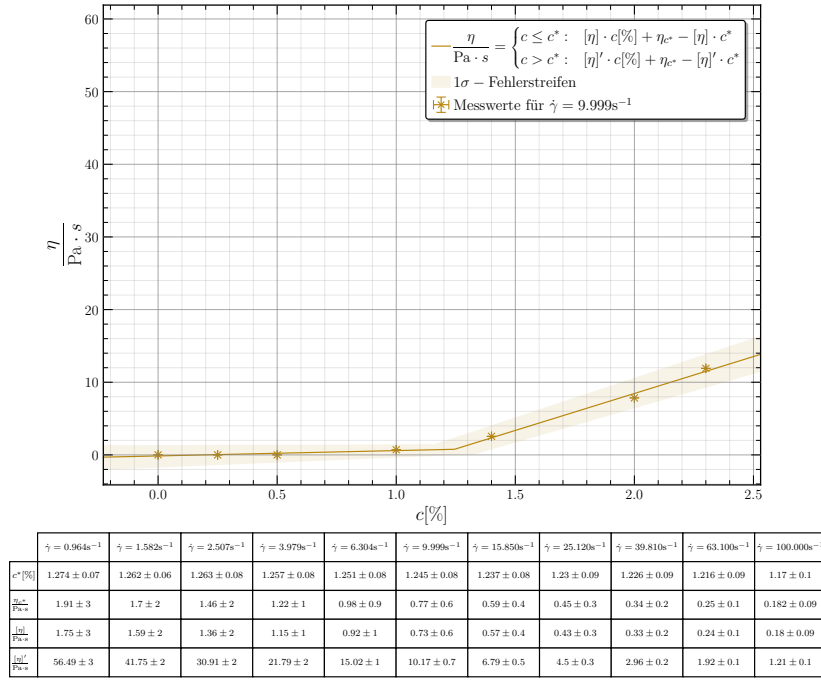
Plot 23 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 3



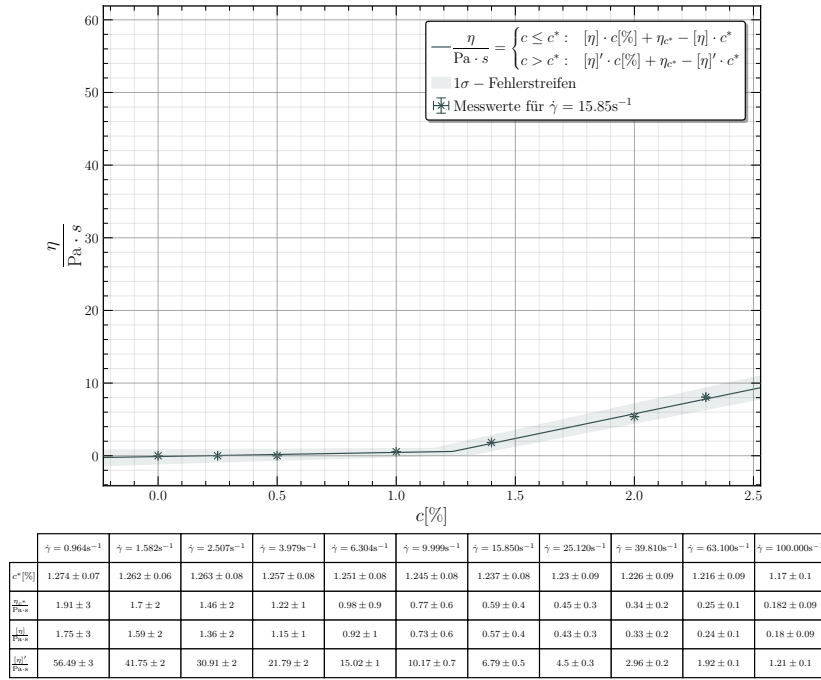
Plot 24 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 4



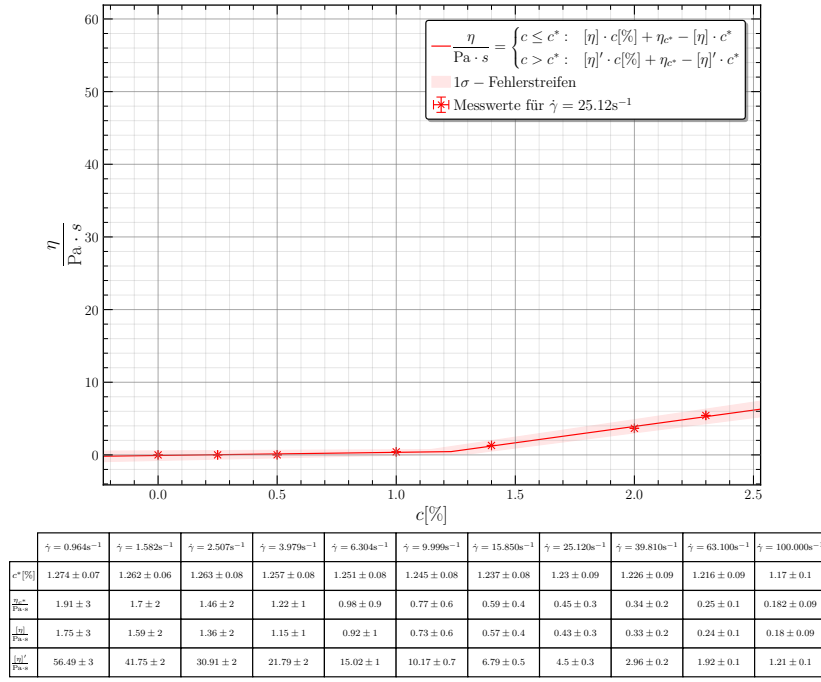
Plot 25 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 5



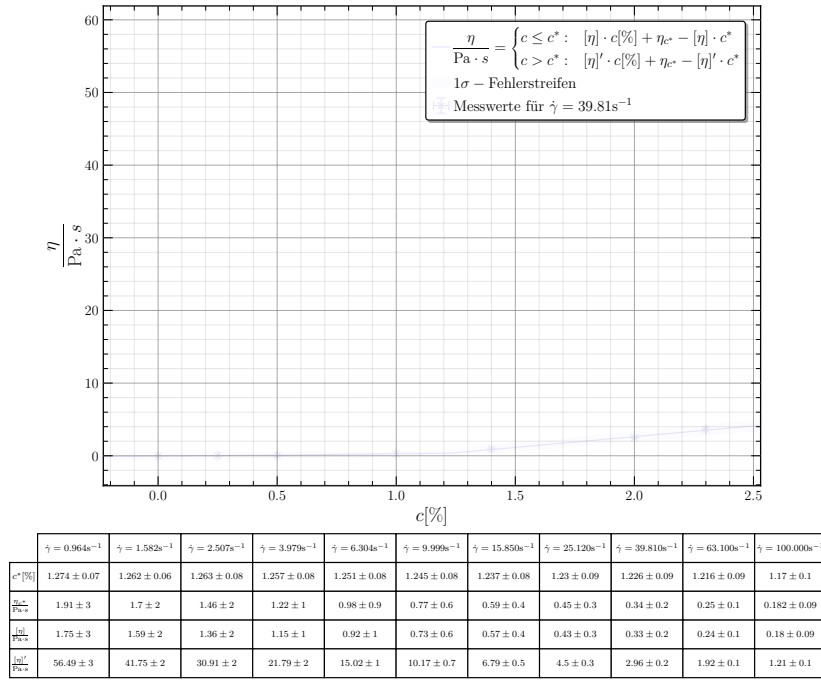
Plot 26 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 6



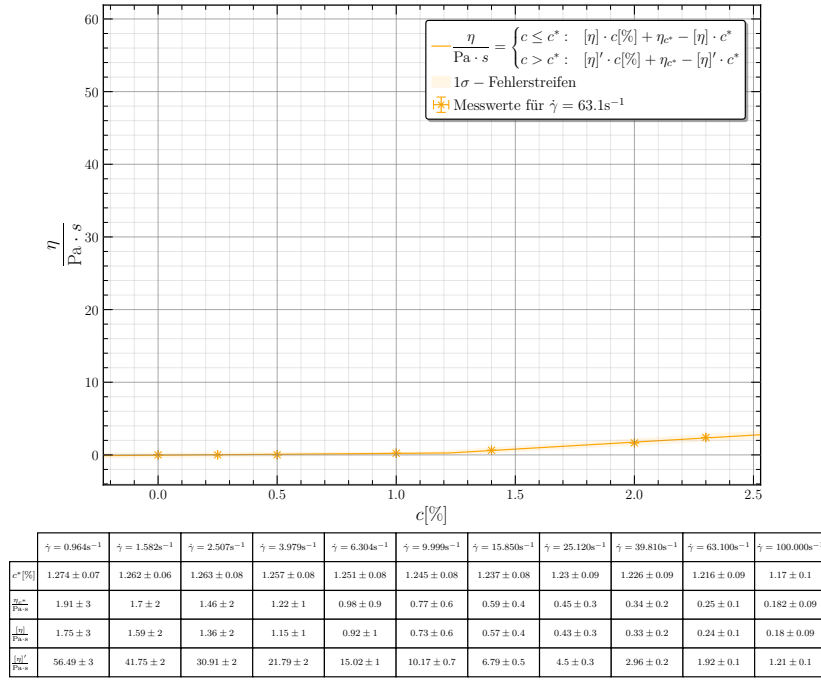
Plot 27 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 7



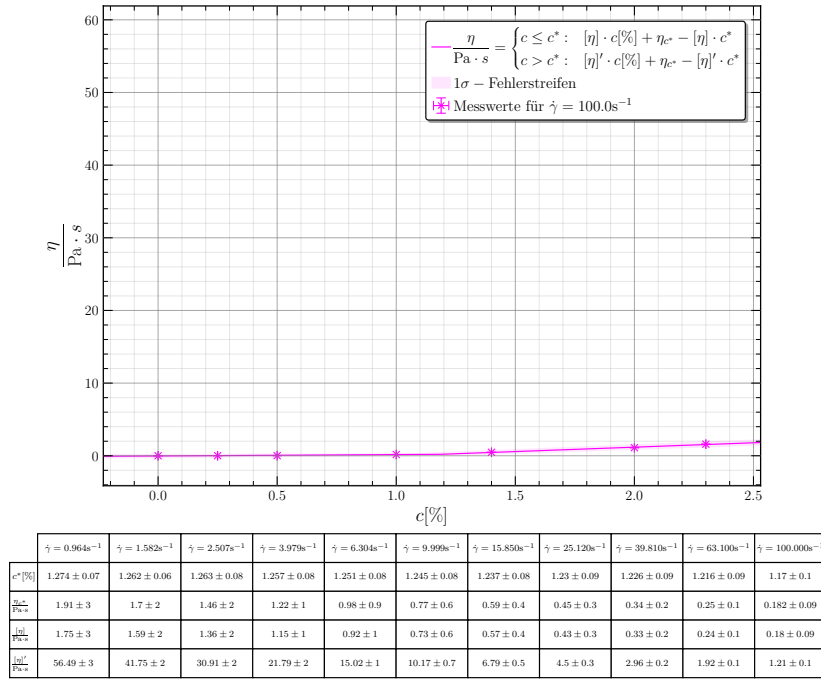
Plot 28 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 8



Plot 29 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 9



Plot 30 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 10



Plot 31 Auftragung von η gegen c bei Guaran für Scherrate 11

B. Python-Skripte zur Auswertung

B.1. Bestimmung des Potenzgesetzes für Saccharose

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sat Dec 3 14:51:49 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8  import numpy as np #math functions, arrays
9  import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
10 from scipy.optimize import curve_fit
11 from itertools import product, combinations
12 import matplotlib
13 import pandas as pd
14
15 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
16 plt.ioff()
17
18
19 def LinXY(x,y):
20     """Scale x and y to obtain an linear relation between
       ordinate and abscissa"""
21     return np.log(x),np.log(y)
22
23 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
24     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
25     return xerr/np.abs(x),yerr/np.abs(y)
26
27 def LinRegr1(x,a,b):
28     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
29     return a*x+b
30
31 def LinRegr(tup, x):
32     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
33     a,b = tup
34     return a*x+b
35
36 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
37     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
38     x = (b2-b1)/(m1-m2)
```

```

39     y = m1*x+b1
40     return x,y
41
42
43 def plot(CSVNAMES):
44
45     fig ,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
46
47     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
48                 midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
49                 darkslategray','red','lavender','magenta']
50
51     shear_ind = 2
52     cs = [0,10,20,40]
53     cs = np.array(cs)
54     maxy = -np.inf
55     miny = np.inf
56     stdList = []
57     poptList = []
58     markers = ['o','x','.', '^', '. ', '+', 'd']
59     ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\eta}{\mathrm{Pa}}\cdot\right)$'
60     xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
61
62     for i,CSVNAME in enumerate(CSVNAMES):
63         PATH = CSVNAME + '.csv'
64         df = pd.read_csv(PATH, sep=',', header=None)
65         y=np.array(df.iloc[:,8])
66         x=np.array(df.iloc[:,7])
67
68         xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x))
69         xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
70         yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
71
72
73         X,Y = LinXY(x,y)
74         Xerr ,Yerr = LinXYerr(xerr ,yerr ,x,y)
75
76         maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
77         miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny

```

```

78
79 dx = (max(X)-min(X))/10
80 dy = (maxy-miny)/15
81 xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
82 ylim = (miny-dy,maxy+dy)
83
84
85 popnt, pcov = curve_fit(LinRegr1,X,Y,maxfev=10000)
86 stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
87
88 t1 = np.linspace(xlim[0],xlim[1], 500)
89
90
91
92 #ax.axvline(popnt[0],marker='None',linestyle='dotted',
93             color='navajowhite',label=r'$c^*$')
94 #ax.axvspan(popnt[0]-stdDev[0],popnt[0]+stdDev[0],
95             linestyle='None',alpha=.2,color='navajowhite')
96 #ax.annotate(r'$c^*$',(popnt[0],(popnt[1]+min(Y))/2),
97             xytext=((popnt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2),(popnt[1]+min(Y))/2),
98             arrowprops=dict(arrowstyle=matplotlib.patches.
99                             ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
100                                     tail_width=.1),color='black'))
101
102 PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
103 PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
104 for tind in range(len(t1)):
105     t = t1[tind]
106     Min = LinRegr(popnt,t)
107     Max = LinRegr(popnt,t)
108     for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
109                                         repeat=len(stdDev)),2):
110         p1 = popnt+stdDev*comb1
111         p2 = popnt+stdDev*comb2
112         Min = min(LinRegr(p1,t),Min)
113         Max = max(LinRegr(p2,t),Max)
114     PointWise_LowerBound[tind] = Min
115     PointWise_UpperBound[tind] = Max
116
117 if i == 0:
118     ax.plot(t1,LinRegr(popnt,t1), marker = 'None',
119             linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
120             ylabel[: -1] + '\alpha_\cdot'+xlabel[1: -1] + '+\beta$')

```

```

112         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
113                           PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
114                           .1, label = r'$1\sigma-\text{Fehlerstreifen}$')
115     else:
116         ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
117                  linestyle = '-', color = colorlist[i])
118         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
119                           PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
120                           .1)
121         ax.plot(X, Y, marker=markers[i], color = colorlist[i],
122                  linestyle='None', label=r'Messwerte für %c='+str(int(
123                  cs[i]))+'\%')
124         popList.append(popt)
125         stdList.append(stdDev)
126
127     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
128     add(np.round(np.transpose(poptList)).astype(str), np.full
129     (np.transpose(poptList).shape, '+'), np.round(np.
130     transpose(stdList)).astype(str))
131     #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
132     add(np.full(np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'),
133     cell_text)), np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'))
134     sigfig = 2
135     stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
136     popFlat = np.array(poptList).flatten()
137
138     stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{}g}'.format(
139     stdDevFlat[i], p=sigfig)))+ '$' for i in range(0, len(
140     stdDevFlat))]
141     decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[1])) for
142     i in range(0, len(stdDev_rounded))]
143     popFlat_rounded = [r'$'+str(round(popFlat[i], decimals[i]))+'
144     pm' for i in range(len(popFlat))]
145     popList = np.reshape(np.array(popFlat_rounded), np.array(
146     popList).shape)
147     stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded), np.array(
148     stdList).shape)
149     cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(popList)
150     , np.transpose(stdList).astype(str))
151
152     the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text,
153     #rowLabels = np.full(7, 'a'),
154     rowLabels=[r'$\alpha$', r'$\beta$'],

```

```

136         colLabels=[r '$c='+str(i)+'\%-$', for i in
137                     cs],
138         loc='bottom',
139         cellLoc='center',
140         bbox=[.1, -0.31, .8, 0.2],
141         edges='closed')
142     #the_table.auto_set_font_size(False)
143     #the_table.set_fontsize(8)
144     ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
145     ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
146     ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
147     ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
148     ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
149             linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
150     ax.legend(loc='best', fontsize=13)
151
152     #fig.tight_layout()
153
154     #-----Save Figure-----
155     plt.savefig("
156         Water_Sucrose_Viscosity_vs_Shearrate_all_Concentrations.
157         pdf", dpi=1200)
158 if __name__ == "__main__":
159     plot(['sac-00-percent', 'sac-10-percent', 'sac-20-percent', '
160         sac-40-percent'])

```

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sat Dec 3 16:40:27 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8
9  import numpy as np #math functions, arrays
10 import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 from itertools import product, combinations
13 import matplotlib
14 import pandas as pd

```

```

15
16 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
17 plt.ioff()
18
19
20 def LinXY(x,y):
21     """Scale x and y to obtain an linear relation between
   ordinate and abscissa"""
22     return np.log(x),np.log(y)
23
24 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
25     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
26     return xerr/np.abs(x),yerr/np.abs(y)
27
28 def LinRegr1(x,a,b):
29     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
30     return a*x+b
31
32 def LinRegr(tup, x):
33     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
34     a,b = tup
35     return a*x+b
36
37 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
38     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
39     x = (b2-b1)/(m1-m2)
40     y = m1*x+b1
41     return x,y
42
43
44 def plot(CSVNAMES):
45
46     fig,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
47
48     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
   midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
   darkslategray','red','lavender','magenta']
49
50     shear_ind = 2
51     cs = [0,10,20,40]
52     cs = np.array(cs)
53     maxy = -np.inf
54     miny = np.inf

```

```

55     stdList = []
56     popList = []
57     markers = ['o', 'x', '.', '^', '._', '+', 'd']
58     ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\sigma}{\mathrm{Pa}}\right)$'
59     xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
60
61     for i, CSVNAME in enumerate(CSVNAMES):
62         PATH = CSVNAME + '.csv'
63         df = pd.read_csv(PATH, sep=',', header=None)
64         y=np.array(df.iloc[:,6])
65         x=np.array(df.iloc[:,7])
66
67
68
69         xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x))
70         xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
71         yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
72
73
74         X,Y = LinXY(x,y)
75         Xerr,Yerr = LinXYerr(xerr,yerr,x,y)
76
77         maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
78         miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny
79
80         dx = (max(X)-min(X))/10
81         dy = (maxy-miny)/15
82         xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
83         ylim = (miny-dy,maxy+dy)
84
85
86         popList, pcov = curve_fit(LinRegr1,X,Y,maxfev=10000)
87         stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
88
89         t1 = np.linspace(xlim[0],xlim[1], 500)
90
91
92
93         #ax.axvline(popList[0],marker='None',linestyle='dotted',
94             color='navajowhite',label=r'$c^*$')
95         #ax.axvspan(popList[0]-stdDev[0],popList[0]+stdDev[0],

```

```

95         linestyle='None', alpha=.2, color='navajowhite')
#ax.annotate(r'$c^*$', (popt[0], (popt[1]+min(Y))/2),
        xytext=((popt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2), (popt[1]+min(Y))/2),
        arrowprops=dict(arrowstyle=matplotlib.patches.
        ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
        tail_width=.1), color='black'))
96
97     PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
98     PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
99     for tind in range(len(t1)):
100         t = t1[tind]
101         Min = LinRegr(popt, t)
102         Max = LinRegr(popt, t)
103         for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
        repeat=len(stdDev)), 2):
104             p1 = popt+stdDev*comb1
105             p2 = popt+stdDev*comb2
106             Min = min(LinRegr(p1, t), Min)
107             Max = max(LinRegr(p2, t), Max)
108         PointWise_LowerBound[tind] = Min
109         PointWise_UpperBound[tind] = Max
110
111     if i == 0:
112         ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
        linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
        ylabel[: -1] + '\alpha\cdot' + xlabel[1: -1] + '+' + '\beta$')
113         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
        PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
        .1, label = r'$1\sigma-\text{Fehlerstreifen}$')
114     else:
115         ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
        linestyle = '-', color = colorlist[i])
116         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
        PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
        .1)
117     ax.plot(X, Y, marker=markers[i], color = colorlist[i],
        linestyle='None', label=r'Messwerte für $c$'+str(int(
        cs[i])) + '\%$')
118     poptList.append(popt)
119     stdList.append(stdDev)
120
121     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.round(np.transpose(poptList)).astype(str), np.full

```



```

122     (np.transpose(poptList).shape, '+-')), np.round(np.
        transpose(stdList)).astype(str))
123 #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.full(np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'),
        cell_text)), np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'))
124 sigfig = 2
125 stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
126 poptFlat = np.array(poptList).flatten()
127 stdDev_rounded = [ '{:g}'.format(float(' {:.{p}g}'.format(
        stdDevFlat[i], p=sigfig)))+ '$' for i in range(0, len(
        stdDevFlat))]
128 decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[1])) for
        i in range(0, len(stdDev_rounded))]
129 popt_rounded = [r '$'+str(round(poptFlat[i], decimals[i]))+' \
        pm' for i in range(len(poptFlat))]
130 poptList = np.reshape(np.array(popt_rounded), np.array(
        poptList).shape)
131 stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded), np.array(
        stdList).shape)
132 cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(poptList)
        , np.transpose(stdList).astype(str))
133
134 the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text ,
135     #rowLabels = np.full(7, 'a'),
136     rowLabels=[r '$\alpha$', r '$\beta$'],
137     colLabels=[r '$c='+str(i)+'\%_-$' for i in
        cs],
138     loc='bottom',
139     cellLoc='center',
140     bbox=[.1, -0.31, .8, 0.2],
141     edges='closed')
142 #the_table.auto_set_font_size(False)
143 #the_table.set_fontsize(8)
144
145 ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
146 ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
147 ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
148 ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
149 ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
        linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
150
151 ax.legend(loc='best', fontsize=13)
152

```

```

153
154     #fig.tight_layout()
155
156     #-----Save Figure-----
157     plt.savefig("
        Water_Sucrose_Stress_vs_Shearrate_all_Concentrations.pdf
        ",dpi=1200)
158
159 if __name__ == "__main__":
160     plot(['sac_00_percent','sac_10_percent','sac_20_percent','
        sac_40_percent'])

```

B.2. Bestimmung des Potenzgesetzes für die Messdaten aus der Literatur

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Wed Dec 14 13:43:06 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8
9  import numpy as np #math functions, arrays
10 import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 from itertools import product, combinations
13 import matplotlib
14 import pandas as pd
15
16 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
    information
17 plt.ioff()
18
19
20 def LinXY(x,y):
21     """Scale x and y to obtain an linear relation between
        ordinate and abscissa"""
22     return x,y
23
24 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
25     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
26     return xerr,yerr

```

```

27
28 def LinRegr1(x,a,b):
29     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
30     return a*x+b
31
32 def LinRegr(tup, x):
33     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
34     a,b = tup
35     return a*x+b
36
37 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
38     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
39     x = (b2-b1)/(m1-m2)
40     y = m1*x+b1
41     return x,y
42
43
44 def plot():
45
46     fig,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
47
48     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
49                 midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
50                 darkslategray','red','lavender','magenta']
51
52     shear_ind = 2
53     cs = [1.45,1,.5,.25]
54     cs = np.array(cs)
55     maxy = -np.inf
56     miny = np.inf
57     stdList = []
58     popList = []
59     markers = ['o','x','.', '^', '. ', '+', 'd']
60     ylabel = r'$\mathrm{log}_{-10}\left(\frac{\eta}{\mathrm{Pa}}\right)$'
61     xlabel = r'$\mathrm{log}_{-10}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
62
63     imp = pd.read_csv('Guaran_Visk_gammadot_literatur.csv',sep=
64                       ';',header=None)
65     Xs = [np.array(imp.iloc[2*i,:]) for i in range(0,4)]
66     Ys = [np.array(imp.iloc[2*i+1,:]) for i in range(0,4)]

```

```

66     for i in range(0,len(Xs)):
67
68         y=Ys[i]
69         x=Xs[i]
70
71         x = x[~np.isnan(x)]
72         y = y[~np.isnan(y)]
73
74         xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x
75             ))
76         xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
77         yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
78
79         X,Y = LinXY(x,y)
80         Xerr,Yerr = LinXYerr(xerr,yerr,x,y)
81
82         maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
83         miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny
84
85         dx = (max(X)-min(X))/10
86         dy = (maxy-miny)/15
87         xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
88         ylim = (miny-dy,maxy+dy)
89
90
91         popt, pcov = curve_fit(LinRegr1,X,Y,maxfev=10000)
92         stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
93
94         t1 = np.linspace(xlim[0],xlim[1], 500)
95
96
97
98         #ax.axvline(popt[0],marker='None',linestyle='dotted',
99             color='navajowhite',label=r'$c^*$')
100        #ax.axvspan(popt[0]-stdDev[0],popt[0]+stdDev[0],
101            linestyle='None',alpha=.2,color='navajowhite')
102        #ax.annotate(r'$c^*$',(popt[0],(popt[1]+min(Y))/2),
103            xytext=((popt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2),(popt[1]+min(Y))
104            /2),arrowprops=dict(arrowstyle= matplotlib.patches.
105            ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
106            tail_width=.1),color='black'))

```

```

103         if i == 0:
104             ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
                      linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
                      ylabel[: -1] + '=\alpha\cdot'+xlabel[1: -1] + '+\beta$')
105         else:
106             ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
                      linestyle = '-', color = colorlist[i])
107         ax.plot(X, Y, marker=markers[i], color = colorlist[i],
                  linestyle='None', label=r'Messwerte für $c='+str(np.
                  round(cs[i], 2))+'\%$')
108         popList.append(popt)
109         stdList.append(stdDev)
110
111     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.round(np.transpose(popList)).astype(str), np.full
        (np.transpose(popList).shape, '+')), np.round(np.
        transpose(stdList)).astype(str))
112     #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.full(np.full(np.transpose(popList).shape, '$'),
        cell_text)), np.full(np.transpose(popList).shape, '$'))
113     sigfig = 2
114     stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
115     popFlat = np.array(popList).flatten()
116
117     stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{p}g}'.format(
        stdDevFlat[i], p=sigfig)))+'$' for i in range(0, len(
        stdDevFlat))]
118     decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[ -1])) for
        i in range(0, len(stdDev_rounded))]
119     popFlat_rounded = [r'$'+str(round(popFlat[i], decimals[i]))+'\
        pm' for i in range(len(popFlat))]
120     popList = np.reshape(np.array(popFlat_rounded), np.array(
        popList).shape)
121     stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded), np.array(
        stdList).shape)
122     cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(popList)
        , np.transpose(stdList).astype(str))
123
124     the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text,
125         #rowLabels = np.full(7, 'a'),
126         rowLabels=[r'$\alpha$', r'$\beta$'],
127         colLabels=[r'$c='+str(np.round(i, 2))+'\%_
        $' for i in cs],

```

```

128         loc='bottom',
129         cellLoc='center',
130         bbox=[0, -0.31, 1, 0.2],
131         edges='closed')
132     #the_table.auto_set_font_size(False)
133     #the_table.set_fontsize(8)
134
135     ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
136     ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
137     ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
138     ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
139     ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
140           linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
141
142     ax.legend(loc='best', fontsize=11, ncol=2, columnspacing=0.6,
143           labelspace=.3)
144
145     #fig.tight_layout()
146
147     #——Save Figure——
148     plt.savefig("Guar_Viscosity_vs_Shearrate_literature.pdf",
149           dpi=1200)
150
151 if __name__ == "__main__":
152     plot()

```

B.3. Bestimmung des Potenzgesetzes für Guaran

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sat Dec 3 16:47:25 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8  import numpy as np #math functions, arrays
9  import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
10 from scipy.optimize import curve_fit
11 from itertools import product, combinations
12 import matplotlib
13 import pandas as pd

```

```

14
15 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
16 plt.ioff()
17
18
19 def LinXY(x,y):
20     """Scale x and y to obtain an linear relation between
   ordinate and abscissa"""
21     return np.log(x),np.log(y)
22
23 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
24     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
25     return xerr/np.abs(x),yerr/np.abs(y)
26
27 def LinRegr1(x,a,b):
28     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
29     return a*x+b
30
31 def LinRegr(tup, x):
32     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
33     a,b = tup
34     return a*x+b
35
36 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
37     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
38     x = (b2-b1)/(m1-m2)
39     y = m1*x+b1
40     return x,y
41
42
43 def plot(CSVNAMES):
44
45     fig,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
46
47     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
   midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
   darkslategray','red','lavender','magenta']
48
49     shear_ind = 2
50     cs = [0,.25,.5,1,1.4,2,2.3]
51     cs = np.array(cs)
52     maxy = -np.inf
53     miny = np.inf

```

```

54 stdList = []
55 popList = []
56 markers = ['o', 'x', '.', '^', '._', '+', 'd']
57 ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\sigma}{\mathrm{Pa}}\right)$'
58 xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
59
60 for i, CSVNAME in enumerate(CSVNAMES):
61     PATH = CSVNAME + '.csv'
62     df = pd.read_csv(PATH, sep=',', header=None)
63     y=np.array(df.iloc[:,6])
64     x=np.array(df.iloc[:,7])
65
66
67
68     xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x))
69     xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
70     yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
71
72
73     X,Y = LinXY(x,y)
74     Xerr,Yerr = LinXYerr(xerr,yerr,x,y)
75
76     maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
77     miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny
78
79     dx = (max(X)-min(X))/10
80     dy = (maxy-miny)/15
81     xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
82     ylim = (miny-dy,maxy+dy)
83
84
85     popList, pcov = curve_fit(LinRegr1,X,Y,maxfev=10000)
86     stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
87
88     t1 = np.linspace(xlim[0],xlim[1], 500)
89
90
91
92     #ax.axvline(popList[0],marker='None',linestyle='dotted',
           color='navajowhite',label=r'$c^*$')

```



```

93     #ax.axvspan(popt[0]-stdDev[0],popt[0]+stdDev[0],
94               linestyle='None',alpha=.2,color='navajowhite')
95     #ax.annotate(r'$c^*$',(popt[0],(popt[1]+min(Y))/2),
96               xytext=((popt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2),(popt[1]+min(Y))
97               /2),arrowprops=dict(arrowstyle=matplotlib.patches.
98               ArrowStyle("Fancy",head_length=.2,head_width=.2,
99               tail_width=.1),color='black'))
100     """
101     PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
102     PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
103     for tind in range(len(t1)):
104         t = t1[tind]
105         Min = LinRegr(popt,t)
106         Max = LinRegr(popt,t)
107         for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
108         repeat=len(stdDev)),2):
109             p1 = popt+stdDev*comb1
110             p2 = popt+stdDev*comb2
111             Min = min(LinRegr(p1,t),Min)
112             Max = max(LinRegr(p2,t),Max)
113         PointWise_LowerBound[tind] = Min
114         PointWise_UpperBound[tind] = Max
115     """
116     if i == 0:
117         ax.plot(t1,LinRegr(popt,t1), marker = 'None',
118               linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
119               ylabel[: -1] + '\alpha\cdot'+xlabel[1: -1] + '+\beta$')
120         #ax.fill_between(t1,PointWise_LowerBound,
121               PointWise_UpperBound,color=colorlist[i], alpha =
122               .1, label = r'$1\sigma-\text{Fehlerstreifen}$')
123     else:
124         ax.plot(t1,LinRegr(popt,t1), marker = 'None',
125               linestyle = '-', color = colorlist[i])
126         #ax.fill_between(t1,PointWise_LowerBound,
127               PointWise_UpperBound,color=colorlist[i], alpha =
128               .1)
129     ax.plot(X,Y,marker=markers[i], color = colorlist[i],
130           linestyle='None',label=r'Messwerte_für_$c$'+str(np.
131           round(cs[i],2))+'%$')
132     poptList.append(popt)
133     stdList.append(stdDev)
134

```

```

120 cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
    add(np.round(np.transpose(poptList)).astype(str), np.full
    (np.transpose(poptList).shape, '+')), np.round(np.
    transpose(stdList)).astype(str))
121 #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
    add(np.full(np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'),
    cell_text)), np.full(np.transpose(poptList).shape, '$'))
122 sigfig = 2
123 stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
124 poptFlat = np.array(poptList).flatten()
125
126 stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{p}g}'.format(
    stdDevFlat[i], p=sigfig)))+ '$' for i in range(0, len(
    stdDevFlat))]
127 decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[1])) for
    i in range(0, len(stdDev_rounded))]
128 popt_rounded = [r '$'+str(round(poptFlat[i], decimals[i]))+' \
    pm' for i in range(len(poptFlat))]
129 poptList = np.reshape(np.array(popt_rounded), np.array(
    poptList).shape)
130 stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded), np.array(
    stdList).shape)
131 cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(poptList)
    , np.transpose(stdList).astype(str))
132
133 the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text ,
134     #rowLabels = np.full(7, 'a'),
135     rowLabels=[r '$\alpha$', r '$\beta$'],
136     colLabels=[r '$c$'+str(np.round(i, 2))+ '\%_
    $' for i in cs],
137     loc='bottom',
138     cellLoc='center',
139     bbox=[0, -0.31, 1, 0.2],
140     edges='closed')
141 #the_table.auto_set_font_size(False)
142 #the_table.set_fontsize(8)
143
144 ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
145 ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
146 ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
147 ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
148 ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
    linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
149

```

```

150     ax.legend(loc='best', fontsize=11, ncol=2, columnspacing=0.6,
151               labelspace=3)
152
153     #fig.tight_layout()
154
155     #—— Save Figure ——
156     plt.savefig("Guar-Stress-vs-Shearrate-all-Concentrations.
157                 pdf", dpi=1200)
158
159     if __name__ == "__main__":
160         plot(['guar_00000-percent', 'guar_00025-percent', '
161               guar_00050-percent', 'guar_00100-percent', '
162               guar_00140-percent', 'guar_00200-percent', '
163               guar_00230-percent'])

```

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sat Dec 3 15:33:05 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8  import numpy as np #math functions, arrays
9  import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
10 from scipy.optimize import curve_fit
11 from itertools import product, combinations
12 import matplotlib
13 import pandas as pd
14
15 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
16     information
17 plt.ioff()
18
19 def LinXY(x,y):
20     """Scale x and y to obtain an linear relation between
21         ordinate and abscissa"""
22     return np.log(x), np.log(y)
23
24 def LinXYerr(xerr, yerr, x, y):
25     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
26     return xerr/np.abs(x), yerr/np.abs(y)

```

```

27 def LinRegr1(x,a,b):
28     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
29     return a*x+b
30
31 def LinRegr(tup, x):
32     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
33     a,b = tup
34     return a*x+b
35
36 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
37     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
38     x = (b2-b1)/(m1-m2)
39     y = m1*x+b1
40     return x,y
41
42
43 def plot(CSVNAMES):
44
45     fig ,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
46
47     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
48                 midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
49                 darkslategray','red','lavender','magenta']
50
51     shear_ind = 2
52     cs = [0,.25,.5,1,1.4,2,2.3]
53     cs = np.array(cs)
54     maxy = -np.inf
55     miny = np.inf
56     stdList = []
57     poptList = []
58     markers = ['o','x','.','^','.','+','d']
59     ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(-\mathrm{dfrac{\eta}{Pa}}\cdot\right)$'
60     xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
61
62     for i,CSVNAME in enumerate(CSVNAMES):
63         PATH = CSVNAME + '.csv'
64         df = pd.read_csv(PATH,sep=',',header=None)
65         y=np.array(df.iloc[:,8])
66         x=np.array(df.iloc[:,7])

```

```

67
68     xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x
69         ))
70     xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
71     yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
72
73     X,Y = LinXY(x,y)
74     Xerr ,Yerr = LinXYerr(xerr ,yerr ,x,y)
75
76     maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
77     miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny
78
79     dx = (max(X)–min(X)) /10
80     dy = (maxy–miny) /15
81     xlim = (min(X)–dx,max(X)+dx)
82     ylim = (miny–dy ,maxy+dy)
83
84
85     popt , pcov = curve_fit(LinRegr1 ,X,Y,maxfev=10000)
86     stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
87
88     t1 = np.linspace(xlim[0] ,xlim[1] , 500)
89
90
91
92     #ax.axvline(popt[0],marker='None',linestyle='dotted',
93         color='navajowhite',label=r'$c^*$')
94     #ax.axvspan(popt[0]–stdDev[0],popt[0]+stdDev[0],
95         linestyle='None',alpha=.2,color='navajowhite')
96     #ax.annotate(r'$c^*$',(popt[0],(popt[1]+min(Y))/2),
97         xytext=((popt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2),(popt[1]+min(Y))
98         /2),arrowprops=dict(arrowstyle= matplotlib.patches.
99         ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
100         tail_width=.1),color='black'))
101     """
102     PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
103     PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
104     for tind in range(len(t1)):
105         t = t1[tind]
106         Min = LinRegr(popt,t)
107         Max = LinRegr(popt,t)
108         for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
109             repeat=len(stdDev)),2):

```

```

103         p1 = poprt+stdDev*comb1
104         p2 = poprt+stdDev*comb2
105         Min = min(LinRegr(p1, t), Min)
106         Max = max(LinRegr(p2, t), Max)
107         PointWise_LowerBound[tind] = Min
108         PointWise_UpperBound[tind] = Max
109     """
110     if i == 0:
111         ax.plot(t1, LinRegr(poprt, t1), marker = 'None',
112                 linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
113                 ylabel[: -1] + '=\\alpha_\\cdot'+xlabel[1: -1] + '+\\
114                 beta$')
115         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
116                         PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
117                         .1, label = r'$1\\sigma-\\text{Fehlerstreifen}$')
118     else:
119         ax.plot(t1, LinRegr(poprt, t1), marker = 'None',
120                 linestyle = '-', color = colorlist[i])
121         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
122                         PointWise_UpperBound, color=colorlist[i], alpha =
123                         .1)
124     ax.plot(X, Y, marker=markers[i], color = colorlist[i],
125             linestyle='None', label=r'Messwerte_für_$c='+str(np.
126             round(cs[i], 2))+'%$')
127     poprtList.append(poprt)
128     stdList.append(stdDev)
129
130     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
131         add(np.round(np.transpose(poprtList)).astype(str), np.full
132         (np.transpose(poprtList).shape, '+')), np.round(np.
133         transpose(stdList)).astype(str))
134     #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
135         add(np.full(np.full(np.transpose(poprtList).shape, '$'),
136             cell_text)), np.full(np.transpose(poprtList).shape, '$'))
137     sigfig = 2
138     stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
139     poprtFlat = np.array(poprtList).flatten()
140
141     stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{p}g}'.format(
142         stdDevFlat[i], p=sigfig)))+'$' for i in range(0, len(
143         stdDevFlat))]
144     decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[ -1])) for
145         i in range(0, len(stdDev_rounded))]
146     poprt_rounded = [r'$'+str(round(poprtFlat[i], decimals[i]))+'\\

```

```

    pm' for i in range(len(poptFlat))]
```

129 poptList = np.reshape(np.array(popt_rounded),np.array(
 poptList).shape)
130 stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded),np.array(
 stdList).shape)
131 cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(poptList)
 , np.transpose(stdList).astype(**str**))
132
133 the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text ,
134 #rowLabels = np.full(7, 'a'),
 rowLabels=[r'\$\alpha\$',r'\$\beta\$'],
135 colLabels=[r'\$c\$'+**str**(np.round(i,2))+'\%_
136 \$' for i in cs],
 loc='bottom',
137 cellLoc='center',
138 bbox=[0,-0.31,1,0.2],
139 edges='closed')
140
141 #the_table.auto_set_font_size(False)
142 #the_table.set_fontsize(8)
143
144 ax.set_ylim(ylim[0],maxy)
145 ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
146 ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
147 ax.set_xlim(xlim[0],xlim[1])
148 ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
 linestyle='-',linewidth=.008, alpha=.2)
149
150 ax.legend(loc='best', fontsize=11,ncol=2,columnspacing=0.6,
 labelspacing=.3)
151
152
153 #fig.tight_layout()
154
155 #-----Save Figure-----
156 plt.savefig("Guar_Viscosity_vs_Shearrate_all-Concentrations
 .pdf",dpi=1200)
157
158 **if** __name__ == "__main__":
159 plot(['guar_00000_percent','guar_00025_percent','
 guar_00050_percent','guar_00100_percent','
 guar_00140_percent','guar_00200_percent','
 guar_00230_percent'])

B.4. Bestimmung der Konzentrationsabhängigkeit der Viskosität bei Saccharose

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sat Dec 3 16:40:27 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8
9  import numpy as np #math functions, arrays
10 import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 from itertools import product, combinations
13 import matplotlib
14 import pandas as pd
15
16 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
17 plt.ioff()
18
19
20 def LinXY(x,y):
21     """Scale x and y to obtain an linear relation between
   ordinate and abscissa"""
22     return np.log(x),np.log(y)
23
24 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
25     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
26     return xerr/np.abs(x),yerr/np.abs(y)
27
28 def LinRegr1(x,a,b):
29     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
30     return a*x+b
31
32 def LinRegr(tup, x):
33     """Model of a linear function for fitting and plotting"""
34     a,b = tup
35     return a*x+b
36
37 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
38     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
39     x = (b2-b1)/(m1-m2)
```



```

40     y = m1*x+b1
41     return x,y
42
43
44 def plot(CSVNAMES):
45
46     fig ,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
47
48     colorlist = ['forestgreen','maroon','orange','darkgray','
49                 midnightblue','darkmagenta','darkgoldenrod','
50                 darkslategray','red','lavender','magenta']
51
52     shear_ind = 2
53     cs = [0,10,20,40]
54     cs = np.array(cs)
55     maxy = -np.inf
56     miny = np.inf
57     stdList = []
58     popList = []
59     markers = ['o','x','.', '^', '. ', '+', 'd']
60     ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\sigma}{\mathrm{Pa}}\right)$'
61     xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{\dot{\gamma}}{s^{-1}}\right)$'
62
63     for i,CSVNAME in enumerate(CSVNAMES):
64         PATH = CSVNAME + '.csv'
65         df = pd.read_csv(PATH, sep=',', header=None)
66         y=np.array(df.iloc[:,6])
67         x=np.array(df.iloc[:,7])
68
69         xerr_rel= xerr_abs= yerr_rel= yerr_abs = np.zeros(len(x))
70         xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
71         yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
72
73
74         X,Y = LinXY(x,y)
75         Xerr ,Yerr = LinXYerr(xerr ,yerr ,x,y)
76
77         maxy = max(Y) if maxy<max(Y) else maxy
78         miny = min(Y) if miny>min(Y) else miny

```

```

79
80     dx = (max(X)-min(X))/10
81     dy = (maxy-miny)/15
82     xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
83     ylim = (miny-dy,maxy+dy)
84
85
86     popnt, pcov = curve_fit(LinRegr1,X,Y,maxfev=10000)
87     stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
88
89     t1 = np.linspace(xlim[0],xlim[1], 500)
90
91
92
93     #ax.axvline(popnt[0],marker='None',linestyle='dotted',
94               color='navajowhite',label=r'$c^*$')
95     #ax.axvspan(popnt[0]-stdDev[0],popnt[0]+stdDev[0],
96               linestyle='None',alpha=.2,color='navajowhite')
97     #ax.annotate(r'$c^*$',(popnt[0],(popnt[1]+min(Y))/2),
98               xytext=((popnt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2),(popnt[1]+min(Y))/2),
99               arrowprops=dict(arrowstyle=matplotlib.patches.
100                             ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
101                                     tail_width=.1),color='black'))
102
103     PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
104     PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
105     for tind in range(len(t1)):
106         t = t1[tind]
107         Min = LinRegr(popnt,t)
108         Max = LinRegr(popnt,t)
109         for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
110               repeat=len(stdDev)),2):
111             p1 = popnt+stdDev*comb1
112             p2 = popnt+stdDev*comb2
113             Min = min(LinRegr(p1,t),Min)
114             Max = max(LinRegr(p2,t),Max)
115         PointWise_LowerBound[tind] = Min
116         PointWise_UpperBound[tind] = Max
117
118     if i == 0:
119         ax.plot(t1,LinRegr(popnt,t1), marker = 'None',
120               linestyle = '-', color = colorlist[i], label=
121               ylabel[: -1] + '\alpha_\cdot'+xlabel[1: -1] + '+\beta$')

```

```

113         #ax.fill_between(t1,PointWise_LowerBound,
        PointWise_UpperBound,color=colorlist[i], alpha =
        .1, label = r'$1\sigma-\text{Fehlerstreifen}$')
114     else:
115         ax.plot(t1,LinRegr(popt,t1), marker = 'None',
        linestyle = '-', color = colorlist[i])
116         #ax.fill_between(t1,PointWise_LowerBound,
        PointWise_UpperBound,color=colorlist[i], alpha =
        .1)
117         ax.plot(X,Y,marker=markers[i], color = colorlist[i],
        linestyle='None',label=r'Messwerte_für_<math>\beta</math>='+str(int(
        cs[i]))+'%$')
118         popList.append(popt)
119         stdList.append(stdDev)
120
121     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.round(np.transpose(poptList)).astype(str),np.full
        (np.transpose(poptList).shape,'+'), np.round(np.
        transpose(stdList)).astype(str))
122     #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
        add(np.full(np.full(np.transpose(poptList).shape,'$'),
        cell_text)),np.full(np.transpose(poptList).shape,'$'))
123     sigfig = 2
124     stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
125     popFlat = np.array(poptList).flatten()
126
127     stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{p}g}'.format(
        stdDevFlat[i], p=sigfig)))+'$' for i in range(0,len(
        stdDevFlat))]
128     decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[1])) for
        i in range(0,len(stdDev_rounded))]
129     popFlat_rounded = [r'$'+str(round(popFlat[i],decimals[i]))+'\'
        pm' for i in range(len(popFlat))]
130     popList = np.reshape(np.array(popFlat_rounded),np.array(
        popList).shape)
131     stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded),np.array(
        stdList).shape)
132     cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(poptList)
        , np.transpose(stdList).astype(str))
133
134     the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text ,
135         #rowLabels = np.full(7,'a'),
136         rowLabels=[r'$\alpha$',r'$\beta$'],

```

```

137         colLabels=[r '$c='+str(i)+'\%-$', for i in
138                     cs],
139         loc='bottom',
140         cellLoc='center',
141         bbox=[.1, -0.31, .8, 0.2],
142         edges='closed')
143     #the_table.auto_set_font_size(False)
144     #the_table.set_fontsize(8)
145     ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
146     ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
147     ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
148     ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
149     ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
150            linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
151     ax.legend(loc='best', fontsize=13)
152
153     #fig.tight_layout()
154
155     #-----Save Figure-----
156     plt.savefig("
157         Water_Sucrose_Stress_vs_Shearrate_all_Concentrations.pdf
158         ", dpi=1200)
159 if __name__ == "__main__":
160     plot(['sac-00-percent', 'sac-10-percent', 'sac-20-percent', '
161         sac-40-percent'])

```

B.5. Bestimmung der Konzentrationabhängigkeit der Viskosität bei Guaran

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Mon Nov 28 10:49:25 2022
4
5  @author: Jan-Philipp
6  """
7
8  import numpy as np #math functions, arrays
9  import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
10 from scipy.optimize import curve_fit

```

```

11 from itertools import product, combinations
12 import matplotlib
13 import pandas as pd
14
15 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
16 plt.ioff()
17
18
19 def LinXY(x,y):
20     """Scale x and y to obtain an linear relation between
   ordinate and abscissa"""
21     return x,y
22
23
24 def LinXYerr(xerr,yerr,x,y):
25     """Scale xerr and yerr according to LinXY"""
26     return xerr,yerr
27
28 def LinRegr1(x, x0, y0, k1, k2):
29     """Model of a piecewise linear function for fitting and
   plotting"""
30     tup = (x0, y0, k1, k2)
31     return LinRegr(tup, x)
32
33 def LinRegr(tup, x):
34     """Model of a piecewise linear function for fitting and
   plotting"""
35     x0, y0, k1, k2 = tup
36     return np.piecewise(x, [x < x0], [lambda x:k1*x + y0-k1*x0,
   lambda x:k2*x + y0-k2*x0])
37
38 def LineIntersection(m1,m2,b1,b2):
39     """determining the geometric center of the 1-sigma-range"""
40     x = (b2-b1)/(m1-m2)
41     y = m1*x+b1
42     return x,y
43
44 def plot(CSVNAMES):
45     global cellcand
46
47     fig,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
48

```

```

49     colorlist = [ 'darkgreen', 'maroon', 'darkgray', 'midnightblue',
                    'darkmagenta', 'darkgoldenrod', 'darkslategray', 'red', 'lavender', 'orange', 'magenta' ]
50
51     shear_ind = 2
52     x = [0, .25, .5, 1, 1.4, 2, 2.3]
53     x = np.array(x)
54     maxy = 0
55     stdList = []
56     poptList = []
57     gammadotList = []
58     for shear_ind in range(0,11):
59         y = []
60         for CSVNAME in CSVNAMES:
61             PATH = CSVNAME + '.csv'
62             df = pd.read_csv(PATH, sep=',', header=None)
63             y.append(df.iloc[shear_ind, 8])
64
65         y = np.array(y)
66
67         maxy = max(y) if maxy < max(y) else maxy
68
69         xerr_rel = xerr_abs = yerr_rel = yerr_abs = np.zeros(len(x))
70         xerr = x*xerr_rel+xerr_abs
71         yerr = y*yerr_rel+yerr_abs
72
73         ylabel = r '$\dfrac{\eta}{\mathrm{Pa}} \cdot s$'
74         xlabel = r '$c[\%]$'
75
76         X, Y = LinXY(x, y)
77         Xerr, Yerr = LinXYerr(xerr, yerr, x, y)
78         dx = (max(X)-min(X))/10
79         dy = (maxy-min(Y))/15
80         xlim = (min(X)-dx, max(X)+dx)
81         ylim = (min(Y)-dy, maxy+dy)
82
83
84         popt, pcov = curve_fit(LinRegr1, X, Y, p0=(1.3, 5, 2, 35),
                                maxfev=10000)
85         stdDev=np.sqrt(np.diag(pcov))
86
87         t1 = np.linspace(xlim[0], xlim[1], 500)
88

```

```

89
90
91     #ax.axvline (popt[0], marker='None', linestyle='dotted',
92                 color='navajowhite', label=r'$c^*$')
93     #ax.axvspan (popt[0]-stdDev[0], popt[0]+stdDev[0],
94                 linestyle='None', alpha=.2, color='navajowhite')
95     #ax.annotate(r'$c^*$', (popt[0], (popt[1]+min(Y))/2),
96                 xytext=((popt[0]*1.5+max(X)*.5)/(2), (popt[1]+min(Y))
97                       /2), arrowprops=dict(arrowstyle= matplotlib.patches.
98                       ArrowStyle("Fancy", head_length=.2, head_width=.2,
99                       tail_width=.1), color='black'))
100
101     """
102     PointWise_LowerBound = np.zeros(len(t1))
103     PointWise_UpperBound = np.zeros(len(t1))
104     for tind in range(len(t1)):
105         t = t1[tind]
106         Min = LinRegr(popt, t)
107         Max = LinRegr(popt, t)
108         for comb1, comb2 in combinations(product([-1,1],
109                                             repeat=len(stdDev)), 2):
110             p1 = popt+stdDev*comb1
111             p2 = popt+stdDev*comb2
112             Min = min(LinRegr(p1, t), Min)
113             Max = max(LinRegr(p2, t), Max)
114             PointWise_LowerBound[tind] = Min
115             PointWise_UpperBound[tind] = Max
116
117     """
118     if shear_ind == 0:
119         ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
120                 linestyle = '-', color = colorlist[shear_ind],
121                 label=ylabel[:-1]+'=\begin{cases} c \leq c^*: \&
122                 [\eta] \cdot c^* \\ c > c^*: \& [\eta]^\prime \cdot c^* \end{cases}$')
123         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
124                         PointWise_UpperBound, color=colorlist[shear_ind],
125                         alpha = .1, label = r'$1\sigma$-text{
126                         Fehlerstreifen}$')
127     else:
128         ax.plot(t1, LinRegr(popt, t1), marker = 'None',
129                 linestyle = '-', color = colorlist[shear_ind])
130         #ax.fill_between(t1, PointWise_LowerBound,
131                         PointWise_UpperBound, color=colorlist[shear_ind],

```

```

115         alpha = .1)
ax.errorbar(x=X,y=Y,xerr=Xerr,yerr=Yerr,marker='x',
            color = colorlist[shear_ind],linestyle='None',label=
            r'Messwerte_für_\dot\gamma='+str(round(df.iloc[
            shear_ind,7],3))+'\mathrm{s}^{-1}$')
116     poptList.append(popt)
117     stdList.append(stdDev)
118     gammadotList.append(df.iloc[shear_ind,7])
119
120     cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
            add(np.round(np.transpose(poptList)).astype(str),np.full
            (np.transpose(poptList).shape,'+')), np.round(np.
            transpose(stdList)).astype(str))
121     #cell_text = np.core.defchararray.add(np.core.defchararray.
            add(np.full(np.full(np.transpose(poptList).shape,'$'),
            cell_text)),np.full(np.transpose(poptList).shape,'$'))
122     sigfig = 1
123     stdDevFlat = np.array(stdList).flatten()
124     poptFlat = np.array(poptList).flatten()
125
126     np.savetxt('c_star_by_gamma_dot.csv',[np.transpose(poptList)
            ][0],np.transpose(stdList)[0],gammadotList,delimiter=',
            ')
127
128     stdDev_rounded = ['{:g}'.format(float('{:.{p}g}'.format(
            stdDevFlat[i], p=sigfig)))+'$' for i in range(0,len(
            stdDevFlat))]
129     decimals = [len(str(stdDev_rounded[i].split('.')[1])) for
            i in range(0,len(stdDev_rounded))]
130     popt_rounded = [r'$'+str(round(poptFlat[i],decimals[i]))+'\
            pm' for i in range(len(poptFlat))]
131     poptList = np.reshape(np.array(popt_rounded),np.array(
            poptList).shape)
132     stdList = np.reshape(np.array(stdDev_rounded),np.array(
            stdList).shape)
133     cell_text = np.core.defchararray.add(np.transpose(poptList)
            , np.transpose(stdList).astype(str))
134
135     the_table = the_table = plt.table(cellText=cell_text ,
136         #rowLabels = np.full(7,'a'),
137         rowLabels=[r'$c^*[%_]'$,r'$\frac{\eta_c}{c^*}$',r'$\frac{[\eta]}{\eta_c}$',r'$\frac{[\eta]}{[\eta]^\prime}$',r'$\frac{[\eta]}{[\eta_c]^\prime}$',r'$\frac{[\eta]}{[\eta_c]^\prime}$',r'$\frac{[\eta]}{[\eta_c]^\prime}$'],

```



```

138         ],
        colLabels=[r '$\dot{\gamma}=%.3f\mathrm{s}^{-1}$'%i for i in gammadotList],#[
            'Wert', 'Unsicherheit'],
139         loc='bottom',
140         cellLoc='center',
141         bbox=[-0.1, -0.4, 1.2, 0.3],
142         edges='closed')
143     the_table.auto_set_font_size(False)
144     the_table.set_fontsize(8)
145
146     ax.set_ylim(ylim[0], maxy)
147     ax.set_xlabel(xlabel, size=16)
148     ax.set_ylabel(ylabel, size=16)
149     ax.set_xlim(xlim[0], xlim[1])
150     ax.grid(visible=True, which='minor', color="grey",
            linestyle='-', linewidth=.008, alpha=.2)
151
152     ax.legend(loc='best', fontsize=13)
153
154
155     #fig.tight_layout()
156
157     #-----Save Figure-----
158     plt.savefig("
        Viscosity-by-Concentration-Guar-all-Shearrates-without-1sigma
        .pdf", dpi=1200)
159
160 if __name__ == "__main__":
161     plot(['guar_00000_percent', 'guar_00025_percent', '
        guar_00050_percent', 'guar_00100_percent', '
        guar_00140_percent', 'guar_00200_percent', '
        guar_00230_percent'])

```

B.6. Frequenzversuch

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Sat Dec 3 11:27:48 2022
4
5 @author: Jan-Philipp
6 """
7

```

```

8 import numpy as np #math functions , arrays
9 import matplotlib.pyplot as plt #visualizing
10 from scipy.interpolate import make_interp_spline
11 import matplotlib
12 import pandas as pd
13 from scipy.optimize import curve_fit
14
15 matplotlib.style.use('JaPh') #merely contains basic style
   information
16 plt.ioff()
17
18 def Fit(x,a,b,c,d):
19     return np.tanh(a*(x-b))*c+d
20
21 def plot(CSVNAME):
22     global popt1
23     PATH = CSVNAME + '.csv'
24     fig,ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,10/np.sqrt(2)))
25
26     df = pd.read_csv(PATH,sep=',',header=None)
27     Y1=df.iloc[:,10]
28     Y2=df.iloc[:,11]
29     X =df.iloc[:,6]
30     print(Y1,Y2,X)
31     X = np.log(X)
32     Y1 = np.log(Y1)
33     Y2 = np.log(Y2)
34
35     ylabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{G^{\prime}}{\mathrm{Pa}}\right)$,
   $\mathrm{ln}\left(\frac{G^{\prime\prime}}{\mathrm{Pa}}\right)$'
36     xlabel = r'$\mathrm{ln}\left(\frac{f}{\mathrm{Hz}}\right)$'
37
38     Ymax = np.max(np.array([Y1,Y2]),axis=0)
39     Ymin = np.min(np.array([Y1,Y2]),axis=0)
40
41     dx = (max(X)-min(X))/10
42     dy = (max(Ymax)-min(Ymin))/15
43     xlim = (min(X)-dx,max(X)+dx)
44     ylim = (min(Ymin)-dy,max(Ymax)+dy)
45
46     #X_Y1_Spline = make_interp_spline(X, Y1,k=3)
47     #X_Y2_Spline = make_interp_spline(X, Y2,k=3)
48

```