

7 Fluidverhalten

Dieses Kapitel setzt sich mit dem Verhalten des Fluids auseinander, das als eine Lösung makromolekularer Bestandteile in der hochbelasteten Dichtzone von RWDR betrachtet wird. Ziel ist es, die komplexen Vorgänge innerhalb des Fluids unter Berücksichtigung der geringen Abmessungen des Fluidfilmes und der hohen Scherraten mit und ohne Beachtung eines wirkenden Scherratengradienten zu veranschaulichen. Wesentliche Aspekte bei dieser Betrachtung sind das viskoelastische Verhalten und die Funktion des Fluidaustausches bzw. allgemeiner formuliert, die Querbewegungen von Fluid in der Dichtzone, zu der auch das Fördervermögen eines RWDR zählt. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, die Reibung zu reduzieren, ohne die Dichtfähigkeit des Systems zu beeinträchtigen.

Einführend soll das Geschwindigkeitsverhältnis von Umfangs- zu Axialgeschwindigkeit des strömenden Fluids abgeschätzt werden. Es wird eine übliche Umfangsgeschwindigkeit von $u = 10 \text{ m/s}$ angenommen. Die mittlere Axialgeschwindigkeit v_z lässt sich aus einem Förderwert \dot{V} bestimmen, der angibt, wie lange ein RWDR benötigt, um eine bestimmte Menge Fluid von der Bodenseite zur Stirnseite zu fördern. Ein typischer versuchstechnischer Förderwert ist $1 \text{ } \mu\text{l/s}$ [WIE99b]. Bei Berücksichtigung einer mittleren Fluidfilmdicke h von $1 \text{ } \mu\text{m}$ und Wellendurchmesser von 80 mm , ergibt sich eine axiale Fluidgeschwindigkeit von $v_z = 4 \text{ mm/s}$, folglich ein Verhältnis von $v_z / v_x = 1 / 2.500$. Für einen Fördervorgang bedeutet dies, dass ein Fluidelement auf der Bodenseite, dort wo es zugegeben wird, auf einer Kreisbahn beschleunigt wird und sich auf einer schraubenartigen Umlaufbahn während des Fördervorganges in und durch die Dichtzone bewegt. Bei einer angenommenen Dichtzonenbreite von $0,15 \text{ mm}$ benötigt ein Fluidelement $0,038 \text{ s}$ beziehungsweise entspricht dies $1,5$ Umdrehungen der Welle. Die Ablenkung in axialer Richtung ist sehr gering und dies gilt ebenso für die wirkenden viskosen Kräfte in dieser Richtung. Analog gilt dies ebenso für die Belastung des Fluids in der Dichtzone. Die durch die Drehbewegung verursachte Schubbeanspruchung in Umfangsrichtung ist um ein Vielfaches größer, als auftretende Belastungen durch Fluidbewegungen in axialer Richtung. Dennoch sind selbst kleine Fluidbewegungen in axialer Richtung von Bedeutung, da sie über Leckage bzw. die Dichtfähigkeit entscheiden.

7.1 Fluid und Fließverhalten

Im Folgenden wird die Einordnung des Fluids und der Strömungsform mit den spezifischen Ausprägungen vorgenommen.

7.1.1 Deformation und Fließen

In Bild 71 ist die Gesamtheit der möglichen Fließzustände dargestellt: vom rein elastischen idealen Festkörper zum rein viskosen idealen Fluid. Durch Einwirken einer mechanischen Kraft erfahren die Stoffe eine Veränderung ihrer Gestalt oder Größe, eine Deformation. Eine kontinuierliche Deformation wird als Fließen bezeichnet. Aus dem Bild wird ersichtlich, dass die Vorstellung eines rein viskosen Fluids eine Idealvorstellung ist. Sie ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass die Elastizität Null ist, dass bedeutet, es kann sich bei Deformation keine Spannung im Material aufbauen. Folglich geht die Relaxationszeit gegen Null. Analog dazu besitzt ein idealer Festkörper eine unendliche Relaxationszeit, da eine konstante aufgebrachte Last, die im Körper eine Spannung verursacht nicht abgebaut wird.

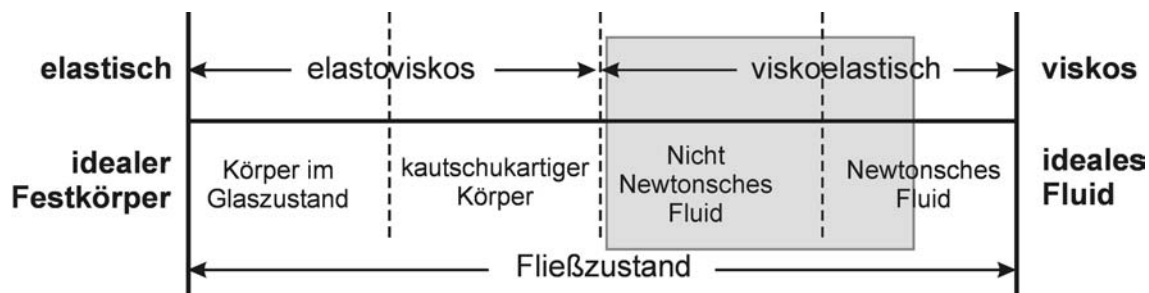


Bild 71: Fließzustände vom idealen Festkörper zum idealen Fluid nach [LNK71]

Der Bereich der Flüssigkeit ist in Bild 71 hervorgehoben. Ist die Flüssigkeit nicht ideal, also nicht rein viskos, so besitzt sie endliche Relaxationszeiten. Diese können im wesentlichen zwei Ursprüngen zugeordnet werden: intra- und intermolekularer Art. Intermolekulare Relaxationszeiten (Verschlaufungen von Molekülketten) sind um Ordnungen größer als die molekulinternen Relaxationszeiten (Segmentdrehungen z. B. C-C-Bindung). Flüssigkeiten, die endliche Relaxationszeiten besitzen, weisen viskoses und gleichzeitig ein elastisches Fließverhalten auf, welches vom Newtonschen Verhalten (Viskosität ist Proportionalitätsfaktor zwischen Scherrate und Schubspannung) abweicht.

In Bild 72 ist die verallgemeinerte Fließkurve für ein reales Fluid dargestellt. Der Schubspannungsverlauf durch die vier dargestellten Bereiche mit zunehmender Scherrate kann für alle Fluide angenommen werden. Allerdings können die einzelnen Bereiche bei sehr

unterschiedlichen Scherraten erreicht werden, und die Ausdehnung der Bereiche kann ebenfalls variieren. Bei einem niederviskosen Öl ist es versuchstechnisch bis heute nicht möglich die einzelnen Bereiche zu durchfahren, da sehr hohe Scherraten nötig sind, um überhaupt in den strukturviskosen Bereich vorzudringen. Hingegen ist dies bei einer Polymerlösung bzw. -schmelze vergleichbar leicht zu erreichen. Die einzelnen Bereiche unterscheiden sich in der Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate, die nur in den beiden Newtonschen Bereichen unabhängig von der Scherrate ist. Im strukturviskosen Bereich erfährt das Fluid durch die Scherung eine innere geordnete Strukturanpassung, die eine unterproportionale Zunahme der Schubspannungen hervorruft. Für ein Mehrbereichsöl kann die Viskosität bei einer Erhöhung der Scherrate deutlich sinken. Untersuchungen von Rozeanu und Maayan zeigen einen 17,5%igen Abfall der Viskosität bei einer Scherraterhöhung von 5.000 1/s auf 38.000 1/s bei 40°C Versuchstemperatur [ROZ87]. Ist diese Strukturierung abgeschlossen, geht der Schubspannungsverlauf in den 2. Newtonschen Bereich über. Weitere Steigerungen der Scherrate bringen das Fluid in die Dilatanz. Hier steigt die Viskosität stark an und die Belastungen des Fluids können so groß werden, dass molekulare Strukturen zerstört werden.

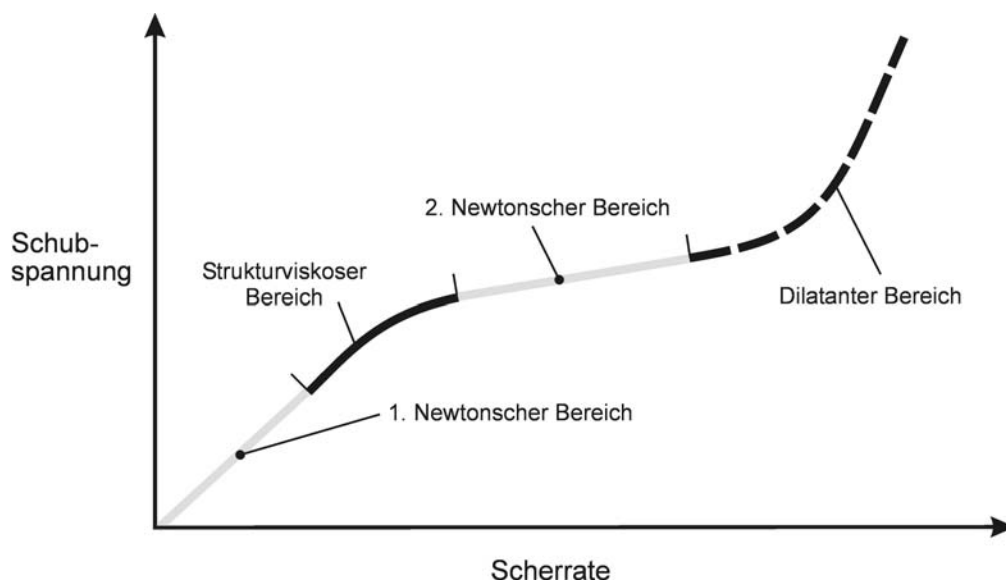


Bild 72: Verallgemeinerte Fließkurve nach [LNK71]

Analog zu Bild 72 ist die vorgestellte allgemeine Reibungskurve (Bild 54, Abschnitt 5.7.1) zu betrachten, die ebenso einen Newtonschen und einen strukturviskosen Bereich enthält, um das Reibungsverhalten der RWDR zu beschreiben. In den Bereichen höherer Scherraten stellen sich Unterschiede in den Kurven ein, da beim RWDR-Reibverhalten die Dünnschichtreibung Berücksichtigung findet.

7.1.2 Strömungsgeometrie

In Bild 73 ist eine RWDR/Wellen-Anordnung im Querschnitt dargestellt. Eine exakte Beschreibung der Geometrie von RWDR- und Wellenoberfläche wäre nur mit einem komplexen Verschleißmodell möglich, da die reibenden Oberflächen dauerhaften Veränderungen ausgesetzt sind. Deshalb wird an dieser Stelle für die Betrachtung des Fluidverhaltens in der Dichtzone von einer idealisierten, vereinfachten Geometrie ausgegangen, die sich aus drei Zonen zusammensetzt (Bild 74).

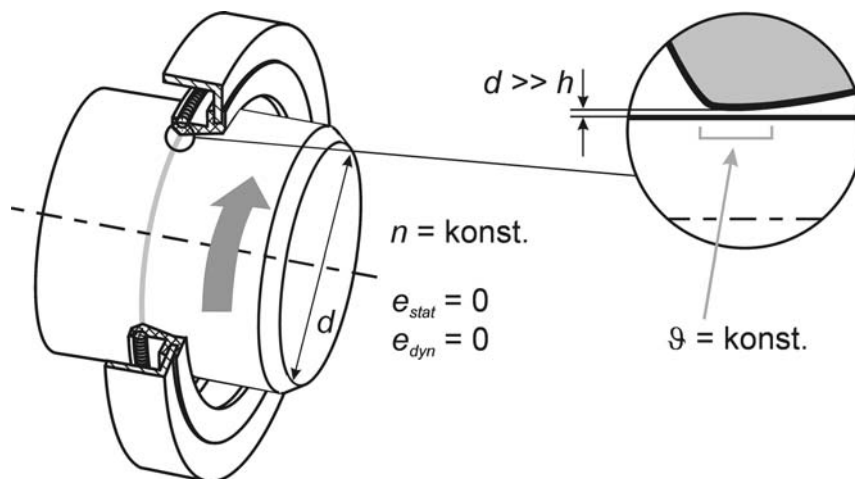


Bild 73: Größenvergleich von Wellendurchmesser und Fluidfilmdicke und idealisierte Betriebsbedingungen durch exakten Rundlauf und gleichmäßige Temperatur

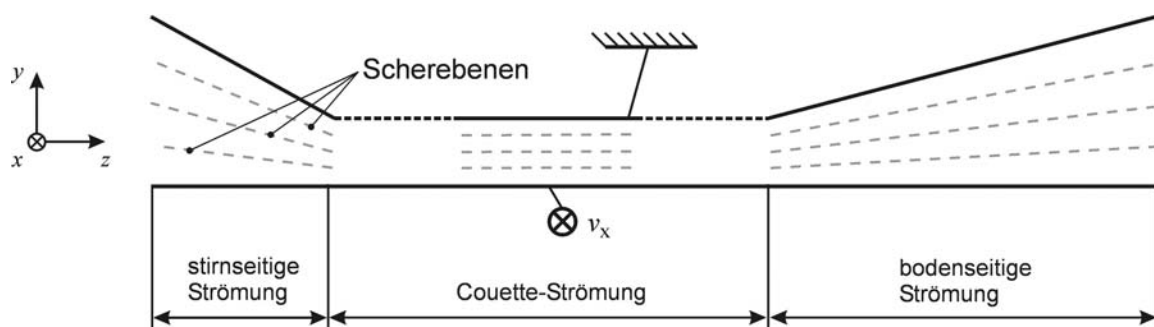


Bild 74: Vereinfachte Strömungsgeometrie

Im inneren Bereich der dargestellten Spaltgeometrie mit konstanter Scherrate bildet sich unter diesen Annahmen eine laminare *Couette-Strömung*⁸ aus. Wird ferner berücksichtigt, dass der Wellendurchmesser um ca. vier Größenordnungen über der Fluidfilmdicke liegt,

⁸ Schichtenströmung in Umfangsrichtung in einem Spalt zwischen coaxial angeordnetem Zylinder und Hohlzylinder, die relativ zueinander rotieren.

kann die Couette-Strömung zwecks einer einfacheren Betrachtung in eine ebene Schichtenströmung überführt werden. Das Verhalten dieser ebenen Strömung wird von *Hentschel* [HNT87] durch das Papierstapelmodell veranschaulicht (Bild 75).

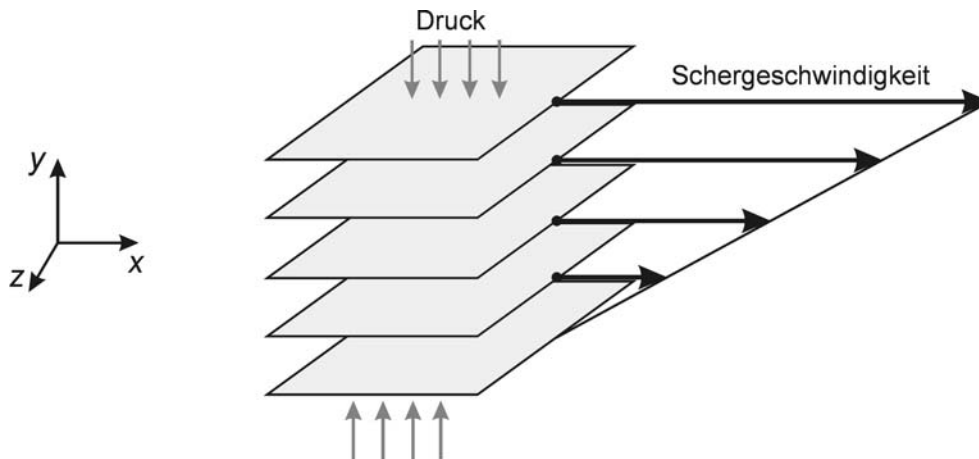


Bild 75: Papierstapelmodell nach [HNT87]

Weitere Annahmen sind, eine konstante Drehzahl der Welle, keine statische und dynamische Exzentrizität (Bild 73).

Tabelle 14: Abschätzung der Reynolds-Zahl für die Strömung in der Dichtzone

Fluidgeschwindigkeit	$u = 1\text{--}25 \text{ m/s}$
Fluidfilmdicke	$h = 1 \text{ }\mu\text{m}$
Dynamische Viskosität	$\eta = 0,01 \text{ Pa s}$ ($\vartheta_{DZ} = 100^\circ\text{C}$)
Dichte des Fluids	$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$

Eine Abschätzung der Reynolds-Zahl, die den Reibungseinfluss des Fluids beschreibt, welche ein Maß für die Strömungsform (turbulent/laminar) darstellt, ergibt mit den Parametern aus Tabelle 14 folgende Werte: $Re_{1\text{m/s}} = 0,08$ bzw. $Re_{25\text{m/s}} = 2$. Beide Reynolds-Zahlen liegen um mehr als Faktor 10^3 unter der Grenze zur Turbulenz von $Re > 2300$ und es wird für die folgenden Betrachtungen von einer laminaren Strömung ausgegangen.

7.1.3 Dichtzonentemperaturverteilung

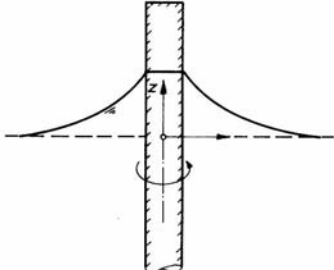
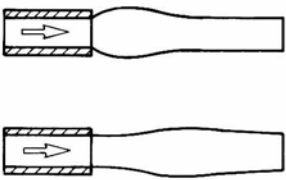
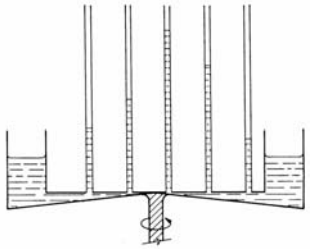
Aufgrund der kleinen gescherten Fläche, ist die Leistungsdichte in der Dichtzone sehr hoch. Die Verlustleistung beträgt für einen handelsüblichen RWDR mit 80 mm Durchmesser bei einer Wellendrehzahl von 3000 1/min ca. 150 W. Das ergibt bei einer Dichtzonbreite von 0,3 mm eine Leistungsdichte von 2 W/mm^2 (im Vergleich: Leistungsdichte

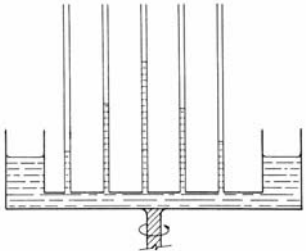
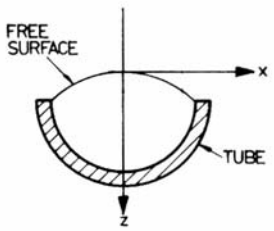
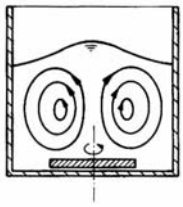
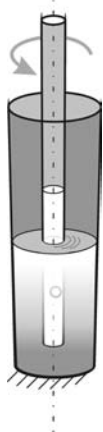
einer Herdplatte beträgt durchschnittlich $0,05 \text{ W/mm}^2$). Der Wärmeeintrag erfolgt in dem schmalen Bereich der Dichtzone ($0,3 \text{ mm}$). Wird ferner berücksichtigt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Elastomers um das 500fache geringer ist (Abschnitt 6.3) als die der Metallwelle, folgt daraus, dass fast die gesamte Verlustleistung über die Welle abgeführt wird und die Welle somit einen sehr geringen Temperaturgradienten aufweist. Aus diesen Angaben wird geschlossen, dass es keine signifikanten Temperaturunterschiede in der sehr schmalen Dichtzone gibt (Bild 73). Für alle weiteren Betrachtungen wird von einer gleichmäßigen Temperatur ausgegangen.

7.1.4 Verhalten von viskoelastischen Fluiden in einer Schichtenströmung

Wie sich die Viskoelastizität in verschiedenen Strömungsformen äußern kann, ist in Tabelle 15 illustriert.

Tabelle 15: Auswirkungen der Viskoelastizität bei unterschiedlichen Strömungsformen

Effekt	Strömungsgeometrie
Der Weissenberg Effekt bezeichnet die Ausbildung einer erhöhten freien Oberfläche, wenn ein dünner Stab in einer viskoelastischen Flüssigkeit rotiert. Es bilden sich Zug-Ringspannungen im Fluid aus, die der Zentripetalkraft entgegenwirken und sich um den Stab zusammenziehen. Die Ringspannung setzt sich maßgeblich aus der 1. Normalspannungsdifferenz zusammen.	 <p>[BHM81]</p>
Strangaufweitung tritt bei dem Austritt einer viskoelastischen Flüssigkeit aus einer Düse auf. Der plötzliche Wegfall der Wandschubspannungen, welche einen inneren Spannungszustand in der Flüssigkeit hervorrufen, hat die „Zwiebelbildung“ zur Folge. Bei hohen Austrittsgeschwindigkeiten erfolgt eine Ablösung der „Zwiebel“ vom Düsenaustritt („Fluid mit Gedächtnis“)	 <p>[BHM81]</p>
Radiale Druckverteilung Kegel/Platte-Anordnung. Der Druck nimmt mit abnehmendem Radius stetig zu. Die Scherrate ist im gesamten Bereich konstant.	 <p>[MVZ63]</p>

<p>Radiale Druckverteilung Platte/Platte-Anordnung. Die Scherrate ist eine Funktion des Radius und nimmt linear mit ihm zu. Die qualitative Druckverteilung ist mit der Kegel/Platte-Anordnung vergleichbar.</p>	 <p>[MVZ63]</p>
<p>Beim Open Channel Flow fließt eine viskoelastische Flüssigkeit einen geneigten offenen halbkreisförmigen Kanal hinunter und es bildet sich eine gekrümmte freie Oberfläche aus, die im Zusammenhang mit der Oberflächenspannung des Fluids ein Maß für die 2. Normalspannungsdifferenz darstellt.</p>	 <p>[KEE80]</p>
<p>Ähnlich dem Weissenberg Effekt können Quelleffekte durch Sekundärströmungen im Fluid entstehen; in nebenstehender Darstellung beispielhaft hervorgerufen durch eine rotierende Scheibe am Boden des Gefäßes.</p>	 <p>[BHM81]</p>
<p>Der Couette-Apparat von Markovitz erzeugt in der inneren rotierenden Röhre einen höheren Druck, als in dem Fluid zwischen den beiden Röhren. Dies wird durch den höheren Fluidstand in der Innenröhre angezeigt, die unter der Fluidoberfläche eine Bohrung aufweist.</p>	 <p>nach [MVZ63]</p>

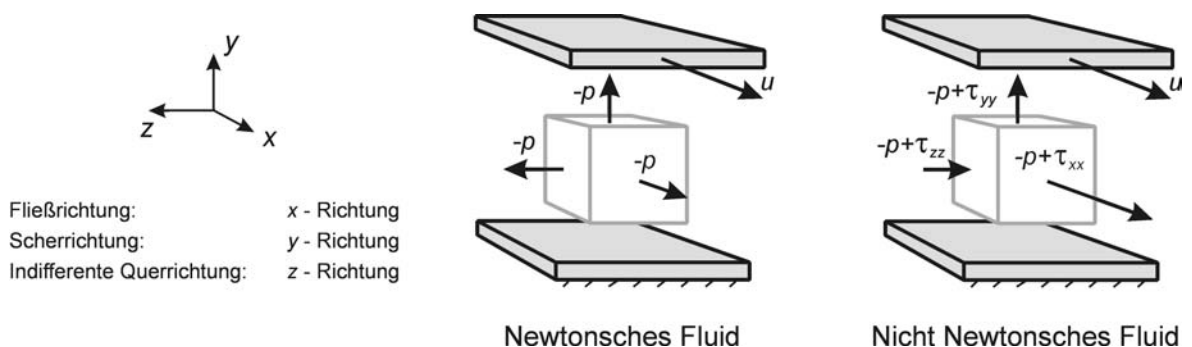


Bild 76: Normalspannungszustand eines Fluidelementes (Newtonsches und nicht Newtonsches Fluid)

Durch die elastischen Spannungen im Fluid werden neue freie Oberflächen gebildet beziehungsweise entstehen in geschlossenen Geometrien veränderte Druckverläufe. Um diesen neuen Spannungszustand an einem Fluidelement zu beschreiben, werden zu den bisherigen Größen von Druck- und Schubspannung noch weitere Normalspannungen hinzugefügt.

In Bild 76 ist ein Normalspannungszustand zweier Fluidelemente für ein Newtonsches und ein nicht Newtonsches Fluid dargestellt. Die Normalspannungen können wie bei einem Festkörper in ihren Raumrichtungen unterschiedlich sein. Um diese Eigenschaft viskoelastischer Fluide zu beschreiben, werden die beiden Normalspannungsdifferenzen definiert. Die Differenzen werden gebildet, um den Druck aus der Betrachtung zu lösen, der auf alle Flächen gleichermaßen wirkt.

$$N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad \text{und} \quad N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz}$$

In Bild 77 sind die Verläufe gemessener Normalspannungsdifferenzen für eine reale Lösung dargestellt (10,5% Polyisobutylene (PIB) in Dekalin). An diesem Spannungsdiagramm ist hervorzuheben, dass die Normalspannungsdifferenzen durchaus höhere Werte als die Schubspannung annehmen können und dass die negative 2. Normalspannungsdifferenz in der Größenordnung von 10-20% der 1. Normalspannungsdifferenz liegt.

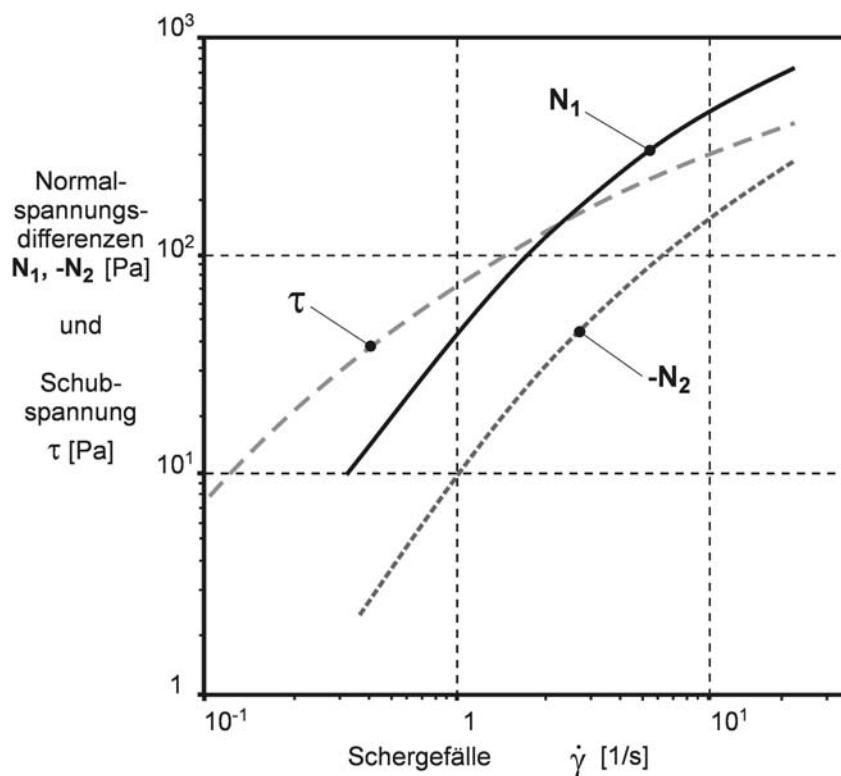


Bild 77: Normalspannungsdifferenzen und Schubspannung in Abhängigkeit vom Schergefälle für eine 10,5%ige PIB/Dekalin-Lösung nach [GNN69]

Der Verlauf der Normalspannungsdifferenzen über die Scherrate kann mit einer quadratischen Funktion angenähert werden. Zusätzlich werden zwei Normalspannungskoeffizienten ν_i eingeführt, welche die Scherraten-, Druck- und Temperaturabhängigkeit der auftretenden Spannungen berücksichtigen.

$$N_i = \nu_i(\dot{\gamma}, \vartheta, p) \dot{\gamma}^2 = \nu_i(\dot{\gamma}, \vartheta, p) \left(\frac{u}{h} \right)^2 \quad F 12$$

Dass Normalspannungsdifferenzen für höherviskose Medien Werte bis in den MPa-Bereich annehmen können, ist von *Göttfert* und *Moos* [GFT89] durch Scherversuche mit Scherraten bis 10^4 1/s für unvernetzten Kautschuk gezeigt. Dies sind Größenordnungen von Normalspannungen, die den Werten der radialen Anpressung der RWDR auf die Wellenoberfläche entsprechen, aber die Scherraten in den durchgeführten Versuchen von *Göttfert* und *Moos* liegen um mehrere Potenzen unter RWDR-üblichen Scherraten.

Für den Einsatz von viskoelastischen Fluiden ist es von Wichtigkeit zu wissen, wo sich der Übergang von einem Newtonschen zu einem nicht Newtonschen Verhalten befindet bzw. wie viele polymere Bestandteile ein Fluid enthalten muss, damit Normalspannungsdifferenzen auftreten. *Gampert et al.* haben das Normalspannungsverhalten von hoch verdünnten Polymerlösungen in einem Kegel/Platte-Rheometer untersucht [GPT96]. Die untersuchten Lösungen (Wasser mit Polyacrylamid (PAA)) weisen bereits bei einer Konzentration von nur 500 ppm eine Abweichung vom Newtonschen Verhalten auf. 500 ppm entsprechen 0,05 Vol.-% und bei einer Dichte von 1 g/cm^3 für das PAA ergibt sich ebenso ein Anteil von 0,05 Gew.-%. Die Additivierung von handelsüblichen Mehrbereichsölen mit makromolekularen Bestandteilen wie Viskositätsindexverbesserern liegt über diesem Anteil von 0,05 Gew.-%. Übliche Additivierungsmengen liegen im Bereich von 1-30 Gew.-% [CHR92, KOO92]. Bei ausreichend hohen Scherraten muss deshalb von strukturviskosem Verhalten bei additivierten Ölen ausgegangen werden.

Ebenso, wie hochverdünnte Polymerlösungen können reine Basisöle ein nicht Newtonsches Fluidverhalten aufzeigen. *Bair* hat höher viskose Grundöle auf Polyalphaolefin-Basis untersucht und ein strukturviskoses Verhalten festgestellt [BAR98]. Er führt dies auf die Ausrichtung der Grundöl-Molekülketten zurück, die deutlich kürzer sind als Polymerketten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass bei ausreichend hohen Scherraten, wie sie in der Dichtzone von RWDR herrschen, auch kürzere Moleküle eine Ausrichtung erfahren können und ein viskoelastisches Verhalten annehmen.

7.2 Versuchsfluide als kolloid-disperse Lösung makromolekularer Bestandteile

In Abschnitt 5.1 ist die Größe makromolekularer Bestandteile von Schmierstoffen abgeschätzt und es ergeben sich Werte von 18-27 nm für die Moleküldurchmesser und die Fluidfilmdicken liegen ebenfalls unter 140 nm für die zu Grunde gelegten Versuchswerte. In Bild 78 sind die zugehörigen Größenordnungen von der Kontinuum-Mechanik bis zur Molekular-Dynamik dargestellt. In dem Bereich dazwischen, der sich über 6 Größenordnungen erstreckt, liegt das Gebiet der Mikro-Rheometrie. Die Mikro-Rheometrie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Längen der Moleküle in vergleichbarer Größe mit den Abmessungen der Strömung liegen (z. B. Fluidfilmdicke) [BRI99b]. Die Betrachtungsweise des Verhaltens der makromolekularen Bestandteile erfolgt daher aus der Sichtweise der Mikro-Rheometrie.

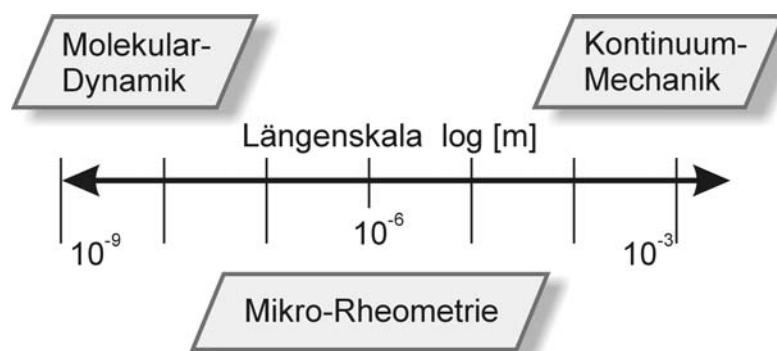


Bild 78: Der Bereich der Mikro-Rheometrie zwischen der Molekular-Dynamik und der Kontinuum-Mechanik nach [BRI99b]

Additivierte Schmierfluide sind auf molekularer Ebene sehr komplex, da sie aus vielen unterschiedlichen Stoffen bestehen, die sich in der elementaren Zusammensetzung, Polarität und Größe unterscheiden. Um die Aussagefähigkeit über das Verhalten von makromolekularen Bestandteilen in der Dichtzone von RWDR zu erhöhen, kommen deshalb Versuchsfluide zum Einsatz, die aus einem unadditivierten Basisöl und einer einzigen Additivkomponente bestehen. Die Versuchsfluide sind in Abschnitt 4.4.1 mit ihren Viskositäts/Temperatur-Kurven vorgestellt.

Die polymeren Bestandteile liegen in gelöster Form im Basisöl vor. Durch Viskositätsmessungen kann die intrinsische Viskosität und daraus das eingenommene Volumen eines Makromoleküls ermittelt werden (Abschnitt 5.1). Die Moleküllängen liegen zwischen 0,048 und 0,190 μm für die zugehörigen Molekulargewichte von 35.000 g/mol bzw. 140.000 g/mol. Dieser Größenwert ist eher theoretisch, da die Moleküle in einer Lösung in ihrer Vorzugsgestalt, der Knäuelform, vorliegen. Die Durchmesser der Knäuel ergeben

sich respektive zu 18 und 27 nm, per Lösungsdefinition ist dies kein molekular-disperses System, sondern eine kolloid-disperse Lösung, da die Bestandteile $> 10^{-9}$ m sind (Definition von Lösungen nach [RMP95]).

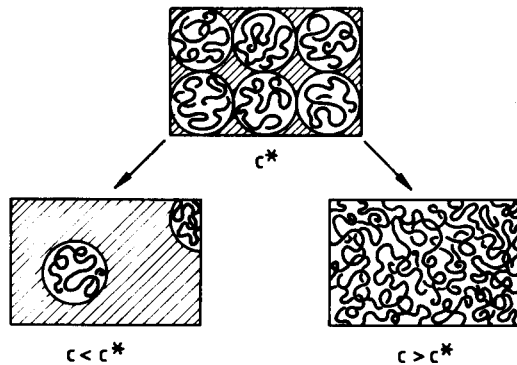


Bild 79: Zunahme der Konzentration von makromolekularen Bestandteilen und Überlappung der Knäuel bei überschreiten der kritischen Konzentration c^* [KUL86]

Einen großen Einfluss auf das Verhalten von Fluiden besitzen Verschlaufungen zwischen den makromolekularen Bestandteilen. Diese Verschlaufungen zwischen den Molekülen können als temporäre Vernetzungspunkte, wie sie in Elastomeren vorliegen, angesehen werden. Das elastische Verhalten wird durch die Existenz von Verschlaufungen erhöht (Vergrößerung der Relaxationszeit). Ob Verschlaufungen in einem Fluid vorliegen, hängt maßgeblich von der Größe der Makromoleküle und der Polymerkonzentration ab.

Sherman *et al.* haben für Polystyrol ein minimales Molekulargewicht für das Auftreten von Verschlaufungen von 18.000 g/mol festgestellt [SHE96]. Bei Polycarbonat kann dieses Molekulargewicht bei 5.000 g/mol liegen [DOB95] und ist damit deutlich geringer. Tabor macht Angaben zu einer Kettenlänge über der sich das Verhalten von Fluiden aufgrund von existierenden Verschlaufungen ändert. Diese Kettenlänge wird mit 500 C-Atomen angegeben [TAB82]. Aus diesen drei Angaben wird für die vorliegenden Untersuchungen gefolgert, dass im Basisöl aufgrund seines geringen Molekulargewichts von durchschnittlich 500 g/mol keine Verschlaufungen vorliegen, wohl aber zwischen den Molekülen des eingesetzten VI-Verbesserers mit einem $M_W = 140.000$ g/mol.

Die weiteren bestimmenden Parameter für die Existenz von Verschlaufungen in Lösungen sind die Konzentration und die Ausdehnung der makromolekularen Bestandteile. Ein anschauliches Maß hierfür stellt der *Knäuelerfüllungsgrad* \tilde{c} dar. Dieser Wert bestimmt sich aus dem Produkt der *intrinsischen Viskosität* $[\eta]$ als Maß für das von einem Knäuel eingenommene Volumen und der *Konzentration* c der makromolekularen Substanz.

$$\tilde{c} = [\eta] c \quad \text{mit} \quad \tilde{c} < 1 \text{ für verdünnte und } \tilde{c} > 6 \text{ konzentrierte Lösungen}$$

Zwischen den Grenzwerten für verdünnte und konzentrierte Lösungen befindet sich ein Übergangsbereich [MCP00]. Bild 79 stellt den Verlauf einer Konzentrationszunahme für ein ruhendes Fluid anschaulich dar. Der skizzierte Zustand im oberen Bild stellt die

theoretisch ideale Packung dar, welche in einem realen Fluid nicht auftritt, da die Temperatur über der absoluten Temperatur liegt. Im Übergangsbereich treten partiell Verschlaufungen auf, wie sie bei höheren Konzentrationen im gesamten Fluid vorkommen.

*Tabelle 16: Knäuelerfüllungsgrade der Versuchsfluide des Scherversuchs
(Basisöl mit PAMA₁₄₀)*

Polymerkonzentration im Basisöl	c [Gew.-%]	2,5%	5%	10%	15%
Knäuelerfüllungsgrad	\tilde{c}	0,75	1,49	2,97	4,46

Die Knäuelerfüllungsgrade der eingesetzten Versuchsfluide sind in Tabelle 16 aufgelistet. Alle Lösungen befinden sich im Übergangsbereich, wobei die 5%ige Lösung nahe einer verdünnten Lösung liegt und die 15%ige Lösung zu einer konzentrierten tendiert.

Die intrinsische Viskosität gibt das beanspruchte Volumen von einem Gramm der gelösten Substanz an. Befindet sich die Lösung in Ruhe, so besitzen die Knäuel im Mittel eine Kugelform, deren Größe sich durch die Kohäsionsenergiedichte der gelösten Bestandteile bestimmt, die den inneren Zusammenhalt zwischen den Kettensegmenten des Makromoleküls beschreibt. Dieser Zustand entspricht gleichzeitig dem Entropiemaximum der Lösung.

7.3 Scherung von gelösten makromolekularen Bestandteilen bei konstanter Scherrate

Ausgehend von einer einfachen Scherströmung (Bild 74 Mitte) wird die Wirkung einer Scherung mit konstanter Scherrate auf die makromolekularen Bestandteile diskutiert. Aufgrund des Größenunterschiedes der molekularen Bestandteile der Polymere zum Lösungsmittel (z. B. Basisöl) liegen die makromolekularen Knäuel im Bereich mehrerer Scherebenen (Bild 80). Sie fließen mit einer mittleren Geschwindigkeit v_K , d. h. je größer die Ausdehnung eines Knäuels in Scherrichtung ist, desto größer sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Knäuel und vorbeiströmendem Fluid. Für die beiden dargestellten idealisierten Körper **a** und **b** in der Grafik gilt folgender Zusammenhang der Fluidgeschwindigkeiten in der Nähe der eingezeichneten Körperpunkte:

$$v_{1a} = v_{2a} < v_{1b} = v_{2b} < v_{Ka} = v_{Kb} < v_{3b} = v_{4b} < v_{3a} = v_{4a}$$

Die Geschwindigkeitsdifferenzen in Scherrichtung verursachen eine Scher- und Normalbelastung auf der Knäueloberfläche, die zu einer Knäueldeformation und -Ausrichtung in der Strömung führen können. Allgemein kann angenommen werden, dass größere Körper einer ebenfalls größeren Deformation unterworfen sind als kleinere Körper mit vergleichbarem Aufbau. Welche Arten von Deformationen und Ausrichtungen es gibt und der Einfluss auf Aggregation von makromolekularen Bestandteilen und die Möglichkeiten von Verschlaufungsausbildungen wird im Folgenden diskutiert.

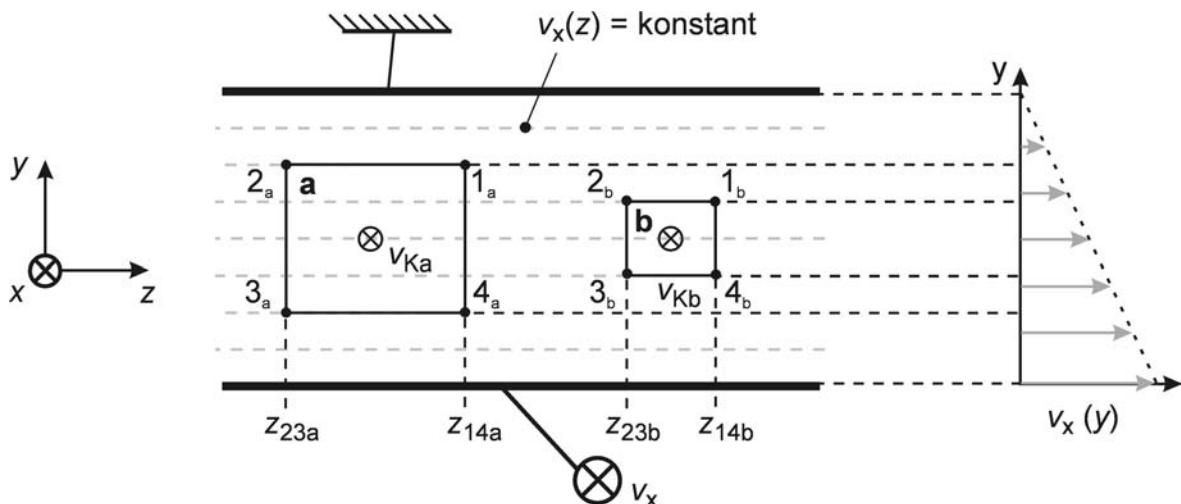


Bild 80: Ausdehnung von idealisierten Körpern über mehrere Scherebenen

7.3.1 Deformation und Ausrichtung

Deformation und Ausrichtung von makromolekularen Bestandteilen in einer Strömung sind eng miteinander verknüpft. In Bild 81 sind zwei typische Bewegungsabläufe dargestellt. Durch die angreifenden Kräfte kann einerseits eine Deformation mit einer bestimmten Ausrichtung des deformierten Körpers in der Strömung erfolgen, andererseits kann der deformierte Körper in der Strömung rotieren und dabei ständig seine Form ändern, so dass er im statistischen Mittel wie eine Kugel betrachtet werden kann.

Die Deformationsfähigkeit ist abhängig vom inneren Zusammenhalt, dementsprechend der Kohäsionsenergiedichte des Körpers und bei vorhandener Oberfläche auch von der wirkenden Oberflächenspannung. Es gilt, wie in Abschnitt 5.4.3 ausgeführt, je unterschiedlicher die Kohäsionsenergiedichten des Körpers und des Lösungsmittels sind, desto geringer wird die Ausdehnung des Körpers in der Lösung sein. Analoges gilt für die Oberflächenspannung, die durch eine gleichmäßige Krümmung der Oberfläche (z. B. Kugel) einer Deformation entgegenwirken kann [LVT96].

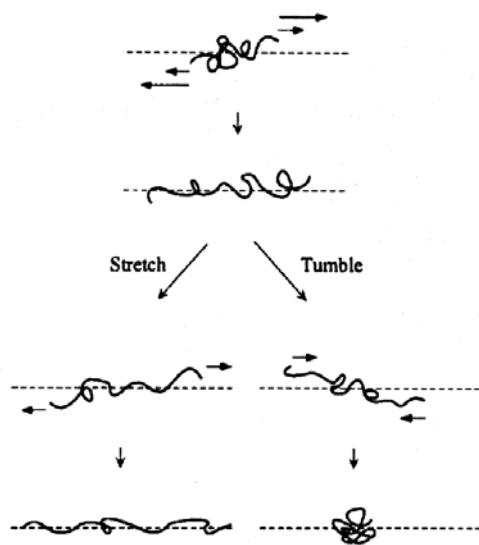


Bild 81: Verhaltensmuster von Makromolekülen bei Scherung [SMI99]

Einen entscheidenden Einfluss auf die wirkenden Kräfte am gelösten makromolekularen Körper besitzt die Scherrate. Bei einem Körper, der sich über mehrere Scherebenen erstreckt kann eine hohe Scherrate große Deformation hervorrufen. Zisenis *et al.* haben Polymerknäuel mit Hilfe der Rheo-Optik in einem Scherspalt beobachtet und eine Deformationszunahme mit steigender Scherrate festgestellt (Bild 82). Die kugelförmigen Bestandteile werden zu Ellipsoiden deformiert, deren Achsverhältnis mit der Scherrate steigt. Bei weiter ansteigender Scherrate kann die ellipsoide Form in die Stabform übergehen.

Ein Maß für die Deformation stellt der Trägheitsradius dar. Durchgeführte Simulationen einer Scherbeanspruchung von Polymermolekülen ergeben einen 4fach größeren Trägheitsradius in Fließrichtung im Vergleich zur Scher- und Querrichtung [AOY00]. Dies entspricht näherungsweise ebenso einer 4fach größeren Ausdehnung des Körpers in dieser Richtung. Mit der Deformation geht ebenfalls die Ausrichtung der zweiten Phase einher. In Bild 82 ist gut die zunehmende Ausrichtung in Strömungsrichtung mit steigender Scherrate zu erkennen.

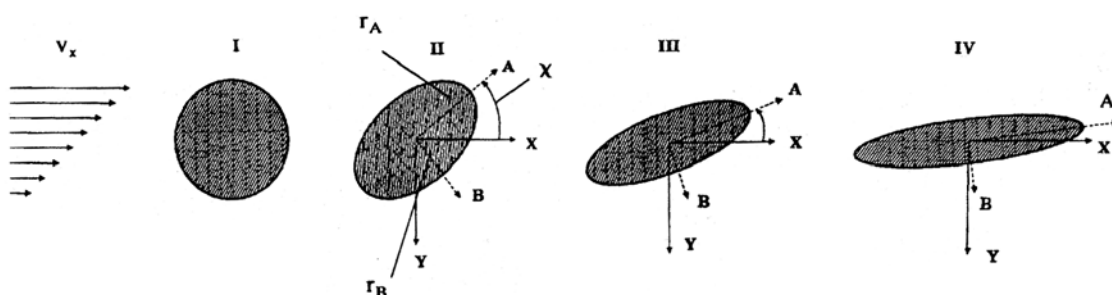


Bild 82: Deformation und Ausrichtung von makromolekularen Bestandteilen bei Scherratenzunahme von I nach IV (A, B Ellipsoidachsen, r_A , r_B Radien der Haupt- und Nebenachse, χ Winkel zwischen Fließrichtung und Hauptachse des Ellipsoids) nach [ZIS95]

Mit der Deformation und der Ausrichtung lässt sich das strukturviskose Verhalten von gescherten Fluiden anschaulich erklären. Mit steigender Scherrate findet eine molekulare Umstrukturierung statt, die das Fließen begünstigt. Die zu Ellipsoiden oder Stäben deformierten und ausgerichteten Makromoleküle gleiten mit geringerem Widerstand aufeinander ab, als ungerichtete kugelförmige Körper. Die geringere Viskosität in Fließrichtung im strukturviskosen Bereich verursacht gleichzeitig eine Erhöhung der Viskosität in den Querrichtungen. Ein Fließen in z -Richtung wird durch die große Ausdehnung der Körper in x -Richtung erschwert.

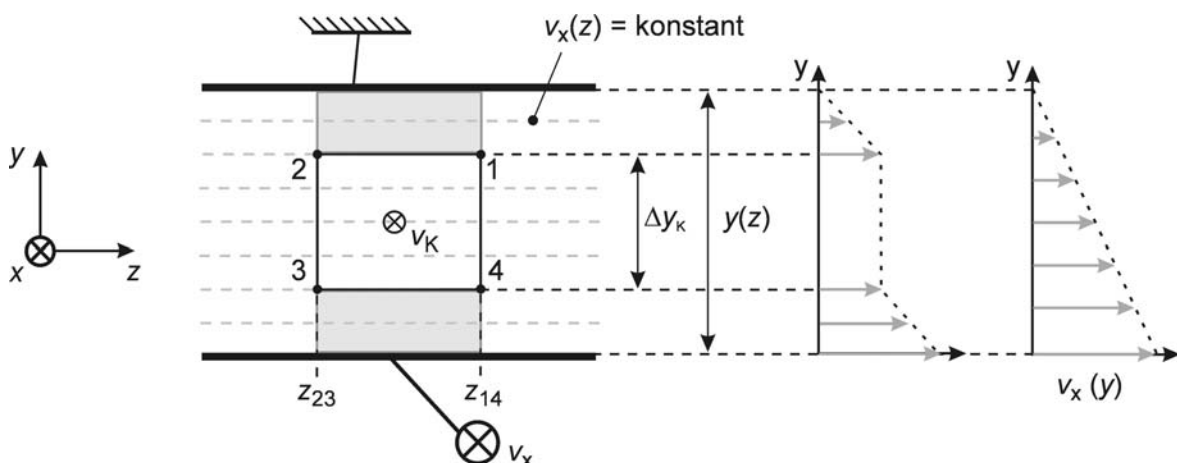


Bild 83: Scherratenerhöhung durch Körperpräsenz in den schattierten Bereichen

Bei der Scherung von Fluiden mit sehr geringer Fluidfilmdicke und mit Bestandteilen in Lösung die nur etwa eine Größenordnung kleiner sind, ist die Erhöhung der Scherrate allein durch die Körperpräsenz nicht zu vernachlässigen. Dies ist in Bild 83 schematisch dargestellt. Der Körper nimmt einen nicht unerheblichen Teil der Fluidfilmdicke ein und erhöht dadurch die Scherrate im verbleibenden Fluid (schattierter Bereich ober- und unterhalb des Körpers), was wiederum die Belastung auf den Körper verstärkt und ihn weiter deformiert. Die resultierenden Scherraten mit und ohne Körper sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Scherratenerhöhung durch Körperpräsenz

Scherrate ohne Körperpräsenz	Scherrate mit Körperpräsenz
$\dot{\gamma}_{oK} = \frac{v_x}{y(z_{14})}$	$\dot{\gamma}_{mK} = \frac{v_x}{y(z_{14}) (1-\phi)}$ mit $\phi = \frac{\Delta y_{14}}{y(z_{14})}$

ϕ gibt den prozentualen Körperanteil im Fluidfilm an. Ein ϕ von 0,5 erhöht die Scherrate im Fluid ebenfalls um 50%. Die zweite Phase bzw. die gelösten Makromoleküle erhöhen

die Deformation und ebenfalls die Ausrichtung, was einer Drehung und einem chaotischen Verhalten wie in Bild 81 dargestellt entgegenwirkt.

7.3.2 Aggregation und Verschlaufung

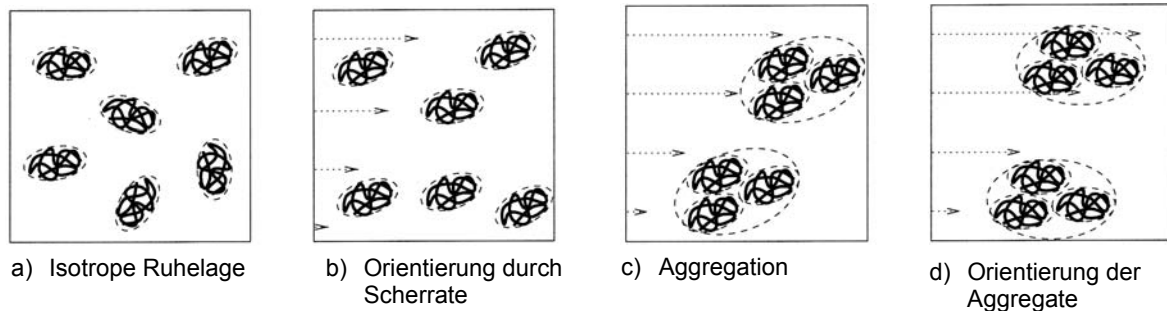


Bild 84: Deformation, Ausrichtung und Anhäufung von makromolekularen Bestandteilen in einer Scherströmung nach [POE98]

Zusätzlich zur Deformation und Ausrichtung von gelösten makromolekularen Strukturen bzw. Körpern in einer Scherströmung, wird die Anhäufung von Körpern zu Gruppen beobachtet (Bild 84). Diese Gruppen richten sich ebenso in der Strömung aus, wie die einzelnen makromolekularen Bestandteile. Die Anhäufung zu Gruppen wird in der Literatur auf zwei Mechanismen zurückgeführt. Diese können gleichzeitig wirksam sein:

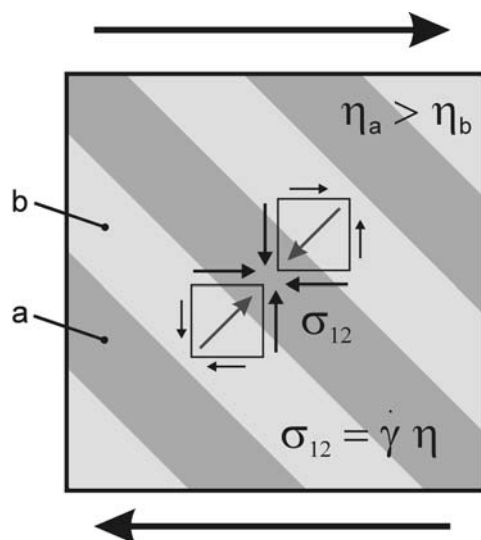


Bild 85: Viskositätsunterschiedverstärkung durch Wirkung der Schubspannungen nach [JIH95]

1. Konzentrationserhöhung durch Viskositätsunterschiede (Bild 85):

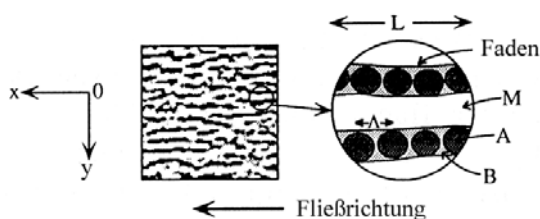
Besitzen die Bestandteile oder Phasen verschiedene Viskositäten, so lässt sich ein Auftreten von Anhäufungen in der Lösung erklären. Durch die Scherung verursachte Schubspannungen rufen größere Spannungen in Bereichen höherer Viskosität hervor und analog dazu kleinere Spannungen in den Bereichen geringerer Viskosität. Dies ist in Bild 85 schematisch dargestellt. Die Richtungen der Spannungen erzeugen eine Verstärkung der Viskositätsunterschiede, welche den natürlichen Ausgleich durch Diffusion dominieren.

2. Konzentrationserhöhung durch Kollision:

Chimmili et al. berichten über Scherversuche einer Suspension aus Maissirup mit Glaskugeln (Durchmesser $4\ \mu\text{m}$) [CMM98]. Die anfänglich gleichmäßig verteilten Kugeln bilden scherinduzierte Anhäufungen in der Suspension aus, welche auf Kollisionen der Kugeln zurückgeführt werden. Durch Kollisionen werden die Kugeln abgebremst und nähern sich an. Große Anhäufungen werden durch zunehmende hydrodynamische Beanspruchung des umströmenden Fluids aufgebrochen.

In einer laminaren Scherströmung lassen sich diese Anhäufungen den Scherebenen zuordnen. Mikroskopische Aufnahmen von *Kume* und *Hashimoto* zeigen fadenartige Strukturen in Strömungsrichtung [KME95]. Die in Fließrichtung ausgerichteten Fäden enthalten eine höhere Konzentration des gelösten Polymers (PS/PB) als das Fluid zwischen den Fäden, welches mehr niederviskoses Lösungsmittel (DOP) enthält.

Wie in Bild 79 (unten rechts) bei einer Konzentrationszunahme von makromolekularen Bestandteilen in einer Lösung dargestellt, treten Verschlaufungen zwischen den Molekülen auf. Bei einer ruhenden Lösung sind Verschlaufungen erst ab einer bestimmten Konzentration zu beobachten. In einer gescherten Lösung können Verschlaufungen schon bei niedrigeren Konzentrationen in den makromolekularen Anhäufungen auftreten. Verschlaufungen wirken wie kurzzeitige feste Vernetzungspunkte und steigern die Elastizität der Phase. Hohe Scherraten verringern die Ausbildung von Verschlaufungen [MMN68]. Dies gilt für Verschlaufungen zwischen den Scherebenen, die mit hoher Geschwindigkeit aufeinander abgleiten und zwischen denen sich eine geringere Konzentration von makromolekularen Bestandteilen befindet [Bild 86]. In den Scherebenen, mit entsprechend erhöhter Konzentration, können sich leichter Verschlaufungen ausbilden.



Viskositätsverhältnis:

$$\eta_A > \eta_B > \eta_M$$

M: Matrixfluid/Lösungsflüssigkeit

A: Wellenlänge für Konzentrationsschwankungen

L: Maß für Fadenlänge

Bild 86: Fadenausbildung in den Scherebenen bei Scherung einer polymeren Lösung nach [KME95]

7.3.3 Verhalten der makromolekularen Bestandteile in der RWDR Dichtzone

Werden die Abschätzungen aus Abschnitt 5.1 bezüglich der Molekülgröße und Fluidfilmdicke angewendet, so sind die makromolekularen Bestandteile einer hohen Scherbelastung

ausgesetzt. Es muss davon ausgegangen werden, dass eine starke Deformation und Ausrichtung der Knäuel in Fließrichtung erfolgt. Wird eine 4fache Ausdehnung der Knäuel in Fließrichtung angenommen, wie sie *Aoyagi* und *Doi* numerisch abschätzen [AOY00], und gelte Volumenkonstanz zwischen Knäueln und Ellipsoiden, so resultieren die Halbachsenmaße in Tabelle 18. Grundlage für die Daten sind die abgeschätzten Molekülgrößen für die eingesetzten PAMA-Lösungen aus Tabelle 7.

Tabelle 18: Größe der deformierten Ellipsoidhalbachsen

PAMA		Knäuelradius	Knäuelvolumen	lange Halbachse		kurze Halbachsen	
M_w	[g/mol]	r	V_h	x'	[nm]	y', z'	[nm]
35.000		6,7	1.260		17		4,3
70.000		9,5	3.590		24		6
140.000		13,4	10.070		34		8,5

Für das PAMA mit dem höchsten Molekulargewicht mit einem Knäueldurchmesser von ca. 27 nm in Ruhe ergibt sich eine Länge des Ellipsoids von 68 nm. Dies ist eine Größenordnung, welche im Bereich der Fluidfilmdicke liegt. Anschaulich ist dies in Bild 87 durch idealisierte Scherebenen mit den enthaltenen makromolekularen Bestandteilen dargestellt. In einem Fluidfilm mit einer Dicke von 100 nm können sich unter diesen Annahmen fünf monomolekulare Scherebenen ausbilden, die sich aus deformierten und ausgerichteten Makromolekülen zusammensetzen.

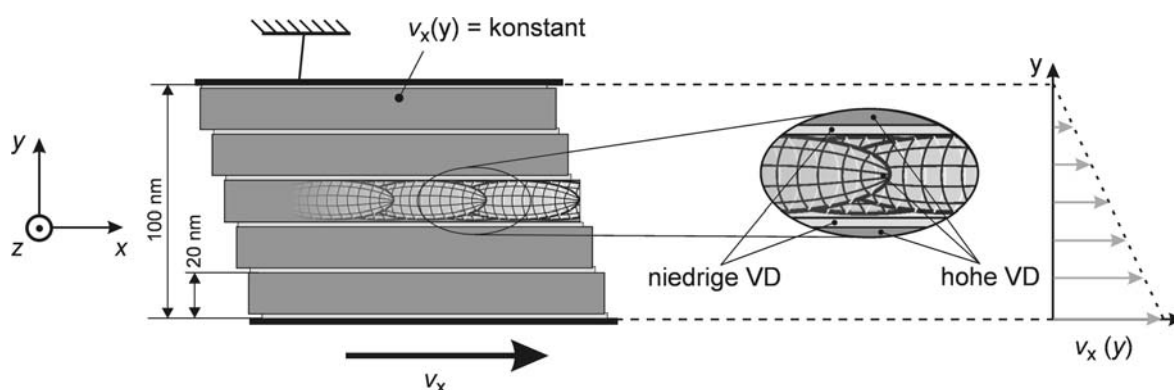


Bild 87: 100 nm Fluidfilmdicke mit fünf Scherebenen

Ein Makromolekül in einer Scherebene einer Strömung ohne Scherratengradient besitzt idealerweise nur zu den vorbeiströmenden Bestandteilen in den über- und untenliegenden Scherebenen Relativgeschwindigkeiten. Bestandteile, welche vor, hinter (Fließrichtung) und seitlich angrenzen (Querrichtung) fließen mit gleicher Geschwindigkeit in der selben

Scherebene. Diese Situation bietet die Möglichkeit zur Ausbildung von höheren Verschlaufungsdichten (VD) in den Scherebenen im Gegensatz zur Verringerung von Verschlaufungen zwischen den Scherebenen.

7.3.4 Einfluss der Oberflächenrauheit und Abschätzung der molekularen Relaxationszeit

Bei der Beschreibung des Fluidverhaltens in der Dichtzone von RWDR sollen die Oberflächenrauheiten auf Welle und Elastomer nicht unberücksichtigt bleiben. Wie wirken die Rauheiten auf die vorüberströmenden Scherebenen? Ausgehend davon, dass für ausreichende Fluidversorgung in der Dichtzone gesorgt ist, wird abgeschätzt, ob die makromolekularen Bestandteile beim Vorüberfließen in die Rauheitstäler eindringen. Ein Maß, welches dieses Verhalten beschreiben kann, ist die molekulare Relaxationszeit. Aus einer durchschnittlichen Rauheitswellenlänge und der Relativgeschwindigkeit von Scherebene zu rauer Oberfläche ergibt sich eine Rauheitsfrequenz und somit eine molekulare Verweildauer für einen Rauheitsberg bzw. -Tal. Liegt diese Verweildauer über der molekularen Relaxationszeit, so muss angenommen werden, dass sich die vorbeiströmenden Scherebenen der Mikrogeometrie der Oberfläche anpassen. Im Gegensatz dazu werden die Scherebenen keinem signifikanten Einfluss ausgesetzt sein, wenn die Relaxationszeiten über der Verweildauer liegen.

Die *molekulare Relaxationszeit* lässt sich nach *Zisenis* folgendermaßen abschätzen [ZIS95]:

$$\tau_{R_mol} = \frac{[\eta] \eta_{\text{Lösungsmittel}} M_W}{R T} \quad F 13$$

Werden die Werte aus Abschnitt 5.1 eingesetzt, ergibt sich für eine Lösung mit einem PAMA-Molekulargewicht von 140.000 g/mol eine Relaxationszeit von 10^{-5} s. Diese Zeit gibt an, nach welcher Zeit die Spannung in einem PAMA-Molekül auf den e^{-1} -Teil absinkt. Im Vergleich zu diesem Wert muss die Rauheitsfrequenz der Oberfläche gesehen werden. Für einen mittleren Rauheitsabstand wird die Elastomeroberfläche herangezogen, da die Wellen in Umfangsrichtung durch die Endbearbeitung meistens eine Rillenstruktur aufweisen. Wird von einem mittleren Rauheitsabstand von 10 μm ausgegangen, und befinden sich in der Dichtzone fünf Scherebenen, so ergibt sich daraus für eine 80 mm Welle bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 1 und 10 m/s jeweils Rauheitsfrequenzwerte von $5 \cdot 10^5$ und $5 \cdot 10^6$ 1/s.

Der abgeschätzte Rauheitsfrequenzwert bzw. der reziproke Wert, die Rauheitsverweildauer, für eine Geschwindigkeit von 1 m/s ist mindestens fünfmal kleiner als die Relaxations-

zeit eines PAMA-Moleküls. Dies ergäbe eine Spannungsrelaxation um 18%. Zusätzlich ist die durchgeführte Abschätzung eine Obergrenze für die Verweildauer, da von einer sehr geringen Umfangsgeschwindigkeit ausgegangen wird. Bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s liegt die Verweildauer schon um Faktor 15 unter der molekularen Relaxationszeit und dies entspricht einer Spannungsrelaxation von nur 6,4%. Eine weitere deutliche Senkung der Spannungsrelaxation tritt durch die auftretenden Verschlaufungen in den Scherebenen ein. Bisher wurde bei dieser Abschätzung stets die Relaxationszeit eines einzelnen Moleküls berücksichtigt. Wird davon ausgegangen, dass die Makromoleküle in den Scherebenen Verschlaufungen ausbilden, so steigt die Relaxationszeit stark an, da die Verschlaufungen wie ein temporäres Netzwerk wirken und diese intermolekularen Relaxationsvorgänge deutlich langsamer sind als intramolekulare [MHH95].

Aus diesem Vergleich der Relaxationszeiten der PAMA-Moleküle mit den Verweilzeiten in den Rauheitstälern bzw. -Bergen lässt sich folgern, dass die Rauheiten keinen wesentlichen Einfluss auf die Änderung des Spannungszustandes der vorüberströmenden Scherebenen besitzen, da die Frequenz der Beanspruchungsänderungen, welche von den Rauheiten auf die Scherebenen ausgeübt wird, zu hoch ist, um lokale temporäre Deformationen hervorzurufen.

7.3.5 Erweiterung des Papierstapelmodells zum Folienmodell

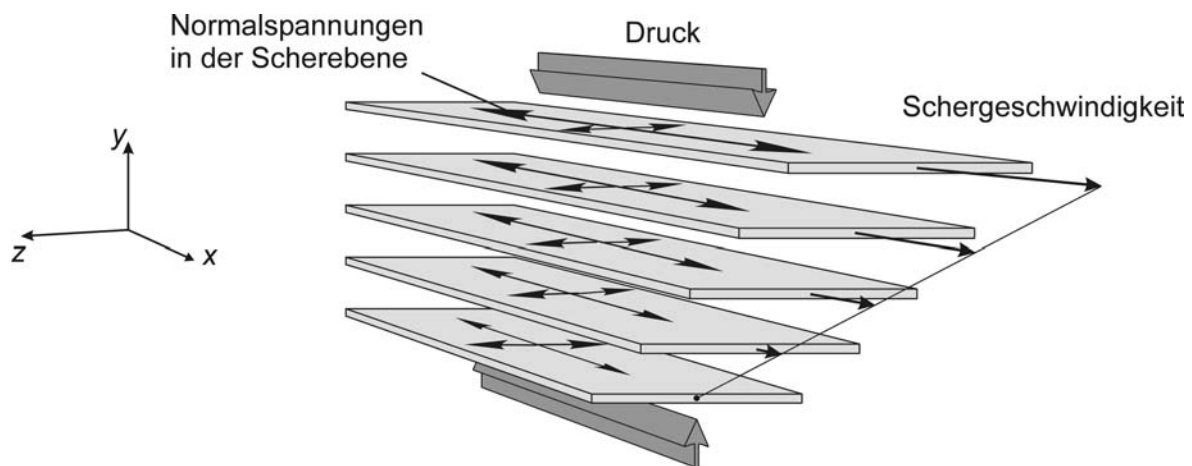


Bild 88: Folienmodell

Um die Viskoelastizität der Scherebenen im Papierstapelmodell von *Hentschel* (Bild 75) darzustellen, wird dieses Modell zu einem Folienmodell erweitert. Die Folie soll dem elastischen Zusammenhalt in den Scherebenen Rechnung tragen und gleichzeitig die in den Ebenen verschlachten makromolekularen Bestandteile symbolisieren. Der Spannungszustand der Ebenen untereinander ist identisch. Da zusätzlich von einer konstanten Scherrate ausgegangen wird, ergibt sich auch innerhalb einer Ebene ein gleichmäßiger Spannungszu-

stand (Bild 88). Neben diesen Spannungen, welche in den Ebenen liegen, nehmen die Scherebenen die radialen Druckspannungen auf, die in den Ebenen zu einer Spannungsreaktion in y -Richtung führen.

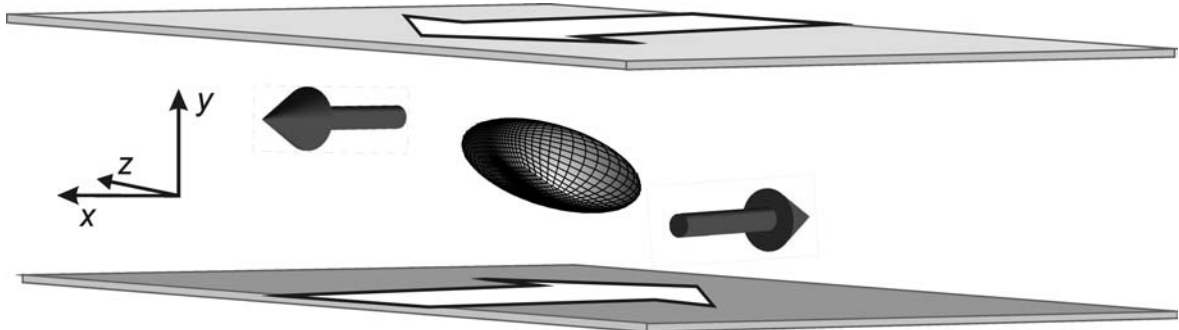


Bild 89: Hauptbelastung und Deformation eines Körpers

In Bild 89 ist exemplarisch ein Makromolekül herausgegriffen und es ist die Zugspannung in Fließrichtung bzw. Hauptdeformationsrichtung durch Pfeile gekennzeichnet. Wie sich die Spannungen in den gescherten Ebenen darstellen ist in Bild 90 gezeigt. Durch den Schub in Fließrichtung, entstehen in der y/x -Ebene Bereiche in denen Zug- und Druckspannungen vorherrschen. Wird die y/z -Ebene betrachtet, so resultieren aufgrund der radialen Pressung Zugspannungen in z -Richtung und Druckspannungen in y -Richtung.

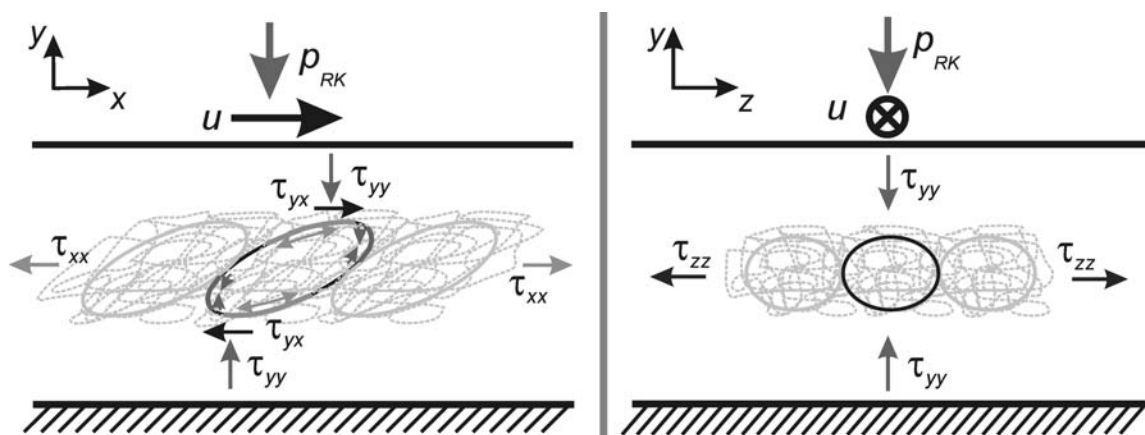


Bild 90: Spannungen der Körper in der Scherebene nach [WIE98a]

Als nächstes werden die gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten von makromolekularen Bestandteilen bei konstanter Scherung auf die Scherung mit einem Scherratengradienten übertragen und diskutiert.

7.4 Scherratengradient ungleich Null

Wird die vereinfachte Strömungsgeometrie aus Bild 74 berücksichtigt, so ergeben sich im Stirn- und Bodenseitenbereich Scherratengradienten. Wie ein Scherratengradient auf einen Körper mit Ausdehnung in z -Richtung wirkt, ist in Bild 91 skizziert. Der Körper ist in dem sich verengenden Scherspalt durch vier Eckpunkte dargestellt und für eine verbesserte Anschaulichkeit ist der Scherspalt gekippt.

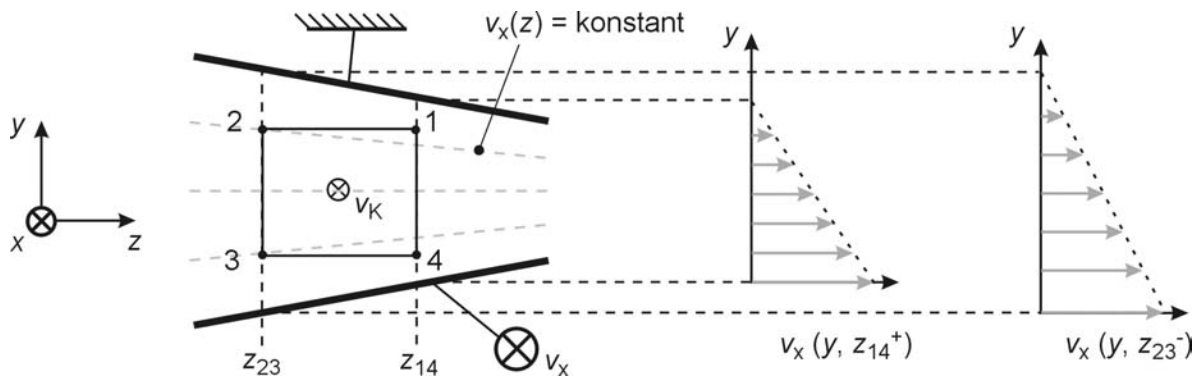


Bild 91: Scherratendifferenzen im sich verengenden Scherspalt [WIE00b]

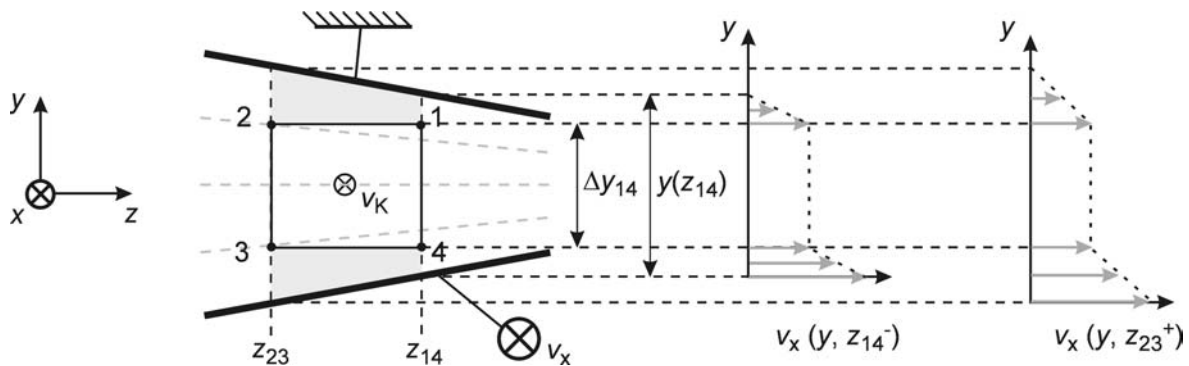


Bild 92: Scherratenerhöhung durch Körperpräsenz [WIE00b]

Für die Auswirkungen des Scherratengradienten werden die vorherrschenden Geschwindigkeiten im Scherspalt betrachtet. Es wird angenommen, dass sich der Körper mit einer mittleren Geschwindigkeit $v_K \approx 0,5 v_x$ in Fließrichtung bewegt. An den Punkten 1, 2 strömt das umgebende Fluid langsamer und in den Punkten 3, 4 schneller am Körper vorbei, was an den eingezeichneten Scherebenen abgelesen werden kann. Bei Berücksichtigung des Scherratengradienten ergibt sich folgende Ungleichung für die Fluidgeschwindigkeiten in der Nähe der Körperpunkte: $v_{x1} < v_{x2} < v_K < v_{x3} < v_{x4}$

Eine zusätzliche Belastungssteigerung erfolgt aus dem Körperanteil im Fluid, wie in Bild 92 gezeigt. Bei Betrachtung eines Körpers mit einer Ausdehnung in z -Richtung, ergibt sich

ein zunehmender Körperanteil in Richtung des verengenden Spaltes inklusive einer gesteigerten Scherbelastung. Die Differenzgeschwindigkeiten an den Körperoberflächen sind in Bild 93 qualitativ durch dunkle Flächen für den Körper dargestellt. Bild 93 kann gleichermaßen für einzelne Makromoleküle und auch verschlaufte Ansammlungen angewandt werden. In verschlauften Ebenen muss beachtet werden, dass die auftretenden Differenzgeschwindigkeiten in den Randbereichen weniger hervortreten, da hier benachbarte verschlaufte Moleküle mit vergleichbarer Geschwindigkeit mitfließen (seitliche gestreifte Bereiche in Bild 93).

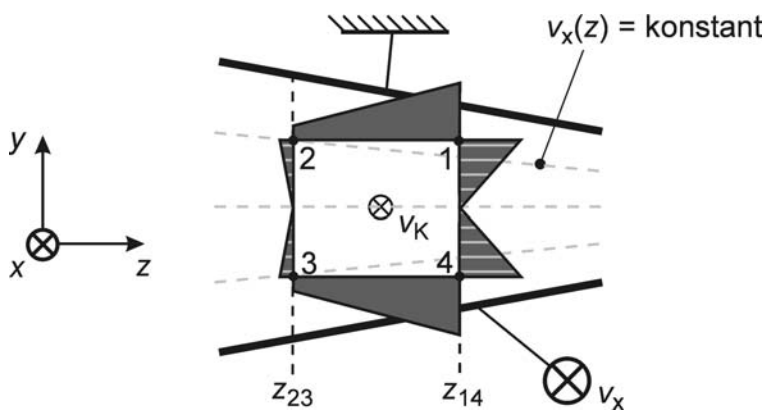


Bild 93: Differenzgeschwindigkeiten am Körper im Scherspalt (symbolisiert durch dunkle Flächen) nach [WIE00b]

Aus dieser ungleichmäßigen Belastung in z -Richtung resultiert ebenso ein Beanspruchungsunterschied, der seine Ausprägung in stärkerer Ausrichtung und Deformation im Bereich der höheren Scherraten besitzt. Dies ist beispielhaft an einem CFD-Modell⁹ in Bild 94 dargestellt. Aus dem Knäuel, welches bei einer konstanten Scherrate in einen Ellipsoiden verformt wird, entsteht ein komplexer Körper, der sich in Abhängigkeit seiner Beanspruchungen verhält. Auf der Seite mit größerer Belastung ist die lange Halbachse des Ellipsoids stärker in Strömungsrichtung ausgerichtet und länger als auf der Seite mit geringerer Belastung. Modellhaft kann dieser Zustand durch einen Körper dargestellt werden, der aus zwei Halbellipsoiden besteht, die durch eine stetig angebundene Freiformfläche miteinander verbunden sind (Anhang Bild A 10).

Kann eine ungleichmäßige Deformation des Körpers, verursacht durch einen Scherratengradient, eine Bewegung in Querrichtung (z -Richtung) hervorrufen? Diese Eigenschaft ist für die Dicht- und Schmierungsfunktion von RWDR von Bedeutung.

⁹ Continuum Fluid Dynamics Modell

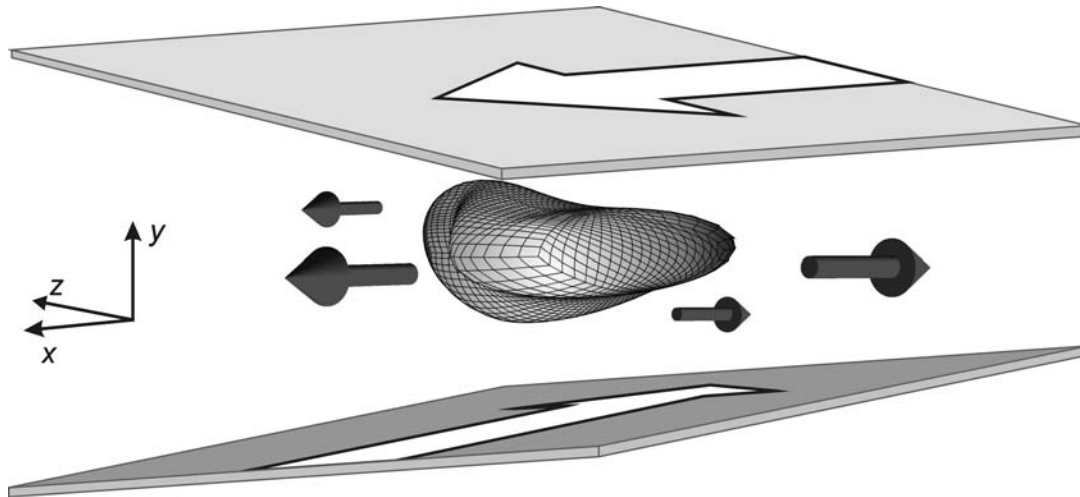


Bild 94: Deformation und Ausrichtung bei Wirkung eines Scherratengradienten

7.5 Querbewegungsanalyse

Querbewegung von Fluid beim RWDR bedeutet eine Fluidbewegung in axialer Richtung, dies entspricht in Richtung Stirnseite – Fluidförderung und in Richtung Bodenseite – Leakage. Wie schon zu Beginn dieses Kapitels abgeschätzt, beträgt das Verhältnis der durchschnittlichen Fluidgeschwindigkeit bei Förderung zu Umfangsgeschwindigkeit der Welle ca. $1 / 2.500$. Geringste Abweichungen von der idealen Fließrichtung in Umfangsrichtung können die Dichtfähigkeit beeinflussen. Im Folgenden werden auftretende Bewegungen quer zur Hauptfließrichtung vorgestellt und diskutiert.

7.5.1 Hydrodynamik (Newtonsch)

Bei der herkömmlichen Vorgehensweise wird von einem reibungsbehafteten, dichtebe-ständigen Fluid ausgegangen. Die Fluidbewegung ist demnach von der Strömungsgeometrie, der Umfangsgeschwindigkeit und als einziger Fluideigenschaft der Viskosität abhängig. Um ein Verbleiben beziehungsweise eine Förderung von Fluid in der Dichtzone mit allein diesen Eigenschaften beschreiben zu können, sind zwei Ansätze entwickelt worden:

Makro-HD: Die Makro-HD beruht auf einer makroskopischen Abweichung vom parallelen Zustand der relativ zueinander bewegten Oberflächen. Diese Abweichung kann durch statische, dynamische Exzentrizität und Schiefstellung des RWDR erzielt werden. Aufgrund der RWDR-Geometrie (bodenseitiger Winkel $<$ stirnseitiger Winkel) führt dies zu einer Fluidbewegung in Richtung Bodenseite (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.1, *Wave Seal* [HRV87], *Schwingförderer* [HRM85], *VEHD-Modell* [SBG90, LEN90]).

Mikro-HD: Bei diesem Ansatz werden die Rauheiten auf der Elastomeroberfläche als hydrodynamisch aktive Strömungsgeometrie herangezogen. Jede einzelne Rauheit verursacht eine Ablenkung des viskosen Fluids. In Abhängigkeit der RWDR-Makrogeometrie, der Oberflächen-Mikro-Geometrie und unter Berücksichtigung der verzerrten Rauheitsstrukturen, kann eine Fluidbewegung in der Dichtzone bestimmt werden (siehe dazu Abschnitt 2.2.2, Entwicklung der *Verzerrungshypothese* [KUZ69, QIA84, KMM86, BVL96, SHI00]).

Grundlage für diese beiden Ansätze bilden einerseits auf der Fluidseite die Reynolds-Gleichung (Fluidfilmdicke in Abhängigkeit von Druckgradient, Viskosität und Relativgeschwindigkeit) und andererseits das gekoppelte elastische Verhalten des Elastomerwerkstoffes, dessen (Oberflächen-)Geometrie und Anpressungsverteilung sich aus dem Speicher- und Verlustmodul und der Anregungsfrequenz ergeben.

7.5.2 Normalspannungsdifferenzen im Fluid

Wie zu Beginn dieses Kapitels vorgestellt, weisen viskoelastische Fluide unter Scherbelastung zusätzlich zu den hydrodynamischen Größen wie Druck und Schub auch Normalspannungsdifferenzen auf. Diese Spannungen, welche aus dem Fluid heraus entstehen, beeinflussen das Fließverhalten des Fluids, wie anschaulich mit dem *Weissenberg Effekt* gezeigt werden kann (Bild 95, Erläuterung siehe Tabelle 15). Um den Einfluss der Normalspannungen auf das Fließverhalten zu beschreiben, wird die Wirkung der Normalspannungsdifferenzen auf ein Molekül bzw. eine verschlaufte Ansammlung von Molekülen beschrieben. Wie in Bild 82 und Bild 90 dargestellt, erfolgt die Ausrichtung und Deformation der Fluidbestandteile in Fließrichtung. Die Aufnahme der Schubspannungen ergibt eine Zugspannung in dieser Richtung. Durch diese Zugspannung resultiert eine Querschnittsverkleinerung in der y/z -Ebene, welche zu Druckspannungen führt, zusätzlich wirkt von außen die Anpressung des RWDR, welche in y -Richtung wirkt. Werden Adsorption und Kohäsion vernachlässigt und verbleibt das Fluid in der Dichtzone, so muss in z -Richtung eine Spannungskomponente im Fluid wirken, die mindestens so groß ist, wie die von außen wirkende Anpressung. Sonst würde das Fluid zu den Seiten der Dichtzone hinausgedrängt. Wird die Anpressung von den Fluidbestandteilen aufgenommen, so ergibt sich eine weitere Deformation in der y/z -Ebene, die in z -Richtung eine Zugspannung hervorruft, welche versucht, die Molekülstruktur zusammenzuziehen.

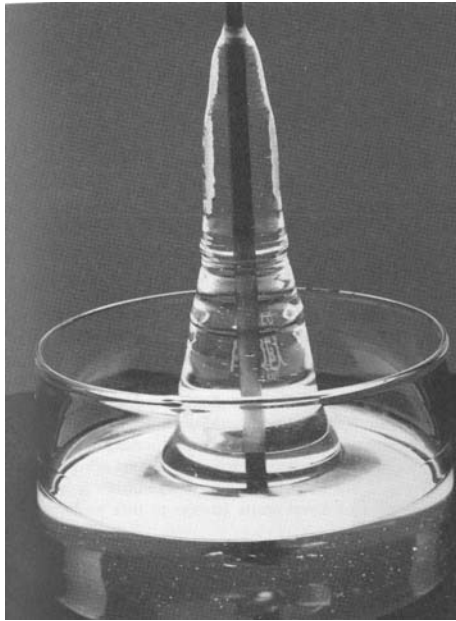


Bild 95: Weissenberg Effekt
[BOG93]

Unter realistischeren Bedingungen bei Berücksichtigung von Adsorption und Kohäsion, die einen Beitrag zum Verbleib des Fluids in der Dichtzone leisten (Abschnitt 5.4), können die Normalspannungen im Fluid geringer sein, um trotzdem ein Verbleib des Fluids zu gewährleisten.

Die von *Oliveira* entwickelte Dicht-, Schmierungshypothese berücksichtigt die Normalspannungsdifferenzen im viskoelastischen Fluid. Die Bewegung des Fluids in Querrichtung ist maßgeblich von der zugehörigen wirkenden Normalspannung in dieser Richtung anhängig, die nach *Oliveira*, bei Förderbetrieb im bodenseitigen Bereich integriert, ein Maß für die Fluidbewegung darstellt (siehe Abschnitt 2.2.3 [OLA96]).

7.5.3 Querbewegung von Partikeln in einer Strömung

In der Vergangenheit sind die meisten Untersuchungen zur Umströmung von Partikeln mit starren Teilchen durchgeführt worden, im Folgenden wird besonders auf die beobachteten Querbewegungen bei diesen Experimenten eingegangen. Auch wenn die Übertragbarkeit auf deformierbare makromolekulare Fluidbestandteile nicht gesichert erscheint, können die Erklärungsansätze nützliche Anhaltspunkte für die weitere Untersuchung von Polymerlösungen bieten. In Bezug zu Vorgängen in der Dichtzone von RWDR bedeutet dies, dass Querbewegungen von Fluidbestandteilen aufgrund von Strömungsgeschwindigkeitsdifferenzen des vorüberströmenden Fluids untersucht werden.

Magnus Effekt

Der Magnus Effekt beschreibt die bei rotierenden umströmten Körpern auftretende Kraftkomponente quer zur Strömungsrichtung. Er kann zum Beispiel sehr deutlich bei Tischtennisbällen beobachtet werden, wenn diesen zusätzlich zur Translationsbewegung eine Rotation (Spin) aufgeprägt wird. In diesen Fällen weicht die Flugbahn deutlich von der durch die Translationsgeschwindigkeit und die Körpermasse bestimmten Flugbahn ab.

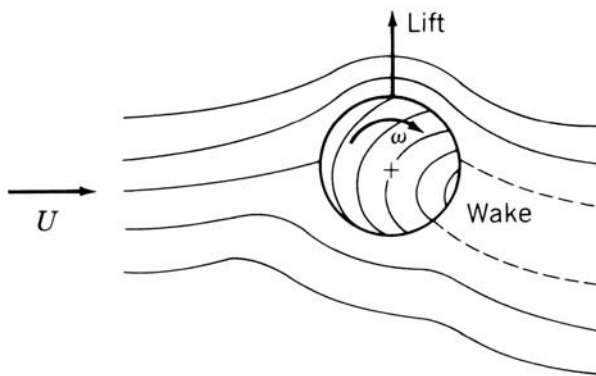


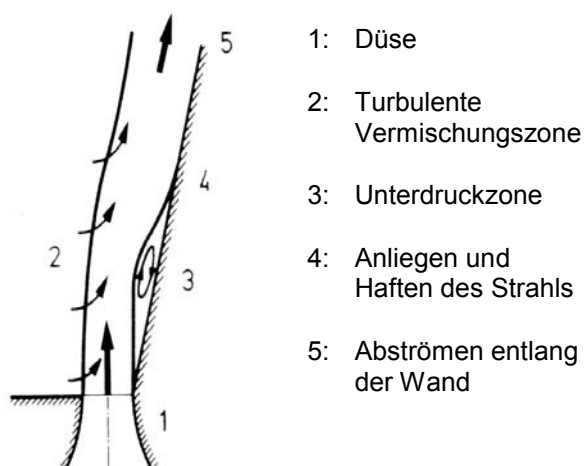
Bild 96: Magnus Effekt [STR79]

Für die auftretende *Liftforce* werden üblicherweise zwei Erklärungen gegeben. Die einfache Variante nutzt die *Bernoulli Gleichung*: Auf der oberen Seite wird die vorüberströmende Luft beschleunigt bzw. vom rotierenden Körper weniger abgebremst als im unteren Bereich des Körpers. Nach *Bernoulli* ergibt sich daraus unten eine Druckerhöhung und oben eine Druckminderung mit einer resultierenden

Kraftkomponente quer zur Strömung, zu der Seite, wo die Richtung von Umfangs- mit Strömungsgeschwindigkeit übereinstimmen (Bild 96).

Eine exaktere Erklärung zur Querbewegung einer umströmten, rotierenden Kugel liefert die Grenzschichttheorie, welche berücksichtigt, dass eine Ablösung der Strömung von der Kugeloberfläche auf der strömungsabgewandten Seite stattfindet. Diese Zone der Ablösung auch als *Wake* bezeichnet, in welcher Rückströmungen auftreten, verändert die Druck- und Schubspannungsverteilung auf der Kugeloberfläche. Durch die Rotation des Körpers liegt der Ablösebereich nicht symmetrisch in Strömungsrichtung und es resultiert eine *Liftforce* nach Integration der Druck- und Schubspannungen.

Coanda Effekt



- 1: Düse
- 2: Turbulente Vermischungszone
- 3: Unterdruckzone
- 4: Anliegen und Haften des Strahls
- 5: Abströmen entlang der Wand

Der *Coanda Effekt* geht auf *Henri Coanda* zurück der herausgefunden hat, dass ein strömendes Fluid der Kontur einer Oberfläche folgt, welche die Strömung begrenzt (Bild 97). Erfolgt eine unterschiedliche Ablenkung des strömenden Fluids auf Ober- und Unterseite eines Körpers aufgrund seiner Geometrie, so ergibt sich durch die Ablenkung eine Kraftkomponente, die quer zur Strömung wirkt.

Bild 97: Coanda Effekt nach [KPP87]

Bandscherapparat

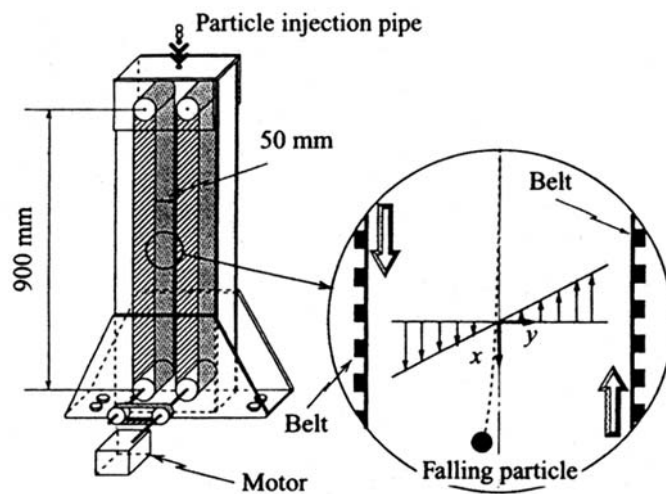


Bild 98: Bandscherapparat [KUR99]

Kurose und *Komori* fahren Versuche mit Stahlkugeln unterschiedlicher Durchmesser (2,4-4 mm), welche sie senkrecht in eine gleichmäßig gescherte Flüssigkeit fallen lassen (Bild 98, [KUR99]). Das Fluid besteht aus einer dünnen Glycerin/Wasser-Lösung. Die Kugeln werden stets zur Seite abgelenkt, wobei die Richtung von der vorherrschenden Reynolds Zahl abhängt. Die Autoren ermitteln experimentell

für $Re < 60$ eine Ablenkung in Richtung der positiven y -Achse und für $Re > 60$ eine Ablenkung in negativer y -Richtung. Diese Ergebnisse werden von den Autoren analytisch bestätigt. Die Richtungsänderung der wirkenden Querkraft wird mit Veränderungen von Druck- und Schubverteilungen auf der Kugeloberfläche begründet. Die geringe Rotation der Kugeln beim Sinken in der gescherten Flüssigkeit besitzt keinen signifikanten Einfluss auf die Querbewegung.

Platte/Platte-Scherversuch

Die Autoren *Feng* und *Joseph* führen Versuche durch, die radiale Bewegungen von Kugeln (\varnothing 250-850 μm , Polystyrol) in einer reinen Torsionsströmung bei Einsatz von Newtonschen (Silikonöl, Glycerin) und nicht Newtonschen Flüssigkeiten (wässrige Polyethylenglykol-Lösung (PGK)) untersuchen [FEN96]. Der Scherapparat in Platte/Platte-Anordnung ist in Bild 99 gezeigt. Die Platten sind durchsichtig zwecks Beobachtung der Partikelbewegungen mit einer Optik **D** und der Raum innerhalb des offenen Zylinders **C** wird mit den Versuchsfluiden gefüllt. Im Gegensatz zu den Experimenten am Bandscherapparat von *Kurose* und *Komori* existiert bei der Platte/Platte-Anordnung ein Scherratengradient in radialer Richtung.

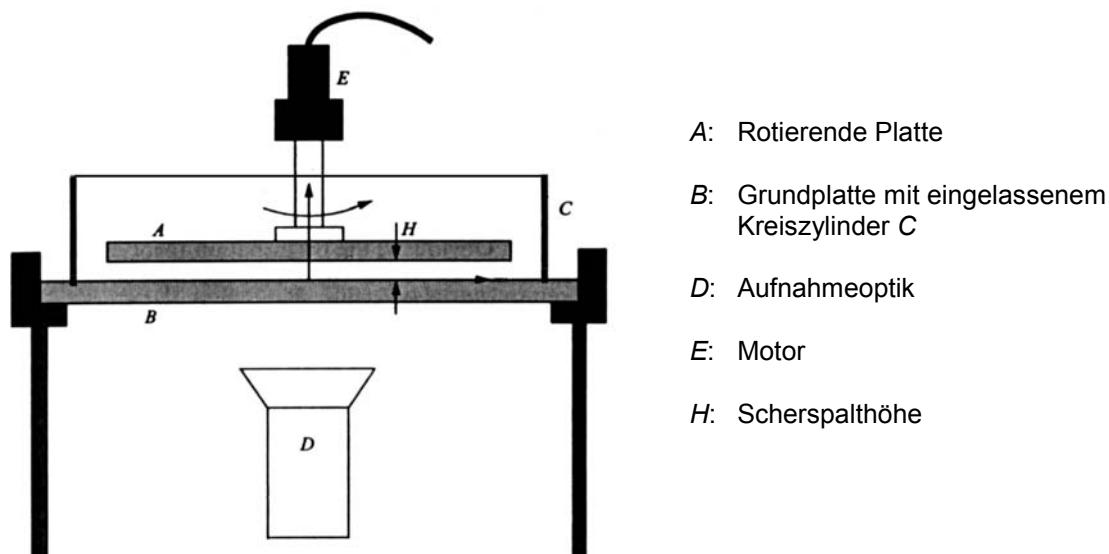


Bild 99: Torsionsscherapparat nach [FEN96]

Ergebnis einzelne Kugel:

Wird eine einzelne Kugel der Strömung zugegeben, so orientiert sie sich in die Mitte der Platten und bewegt sich im nicht Newtonschen Medium in radialer Richtung in den Bereich höherer Scherraten, um danach den Scherbereich zu verlassen. Wird eine Kugel einem Newtonschen Medium zugegeben, so verändert sie ihre radiale Position nicht.

Ergebnis Kugelsuspension:

Das Verhalten einer Kugelsuspension aus einem nicht Newtonschen Fluid ist in Bild 100 dargestellt. Die zu Beginn durchmischte Suspension verändert sich und es bilden sich konzentrische Kreise mit einer hohen Anzahl von Kugeln aus, die ebenso wie einzelne Kugeln in dem nicht Newtonschen Medium nach außen in den Bereich höherer Scherraten wandern. In den untersuchten Newtonschen Medien ist keine Entmischung der Suspension beobachtet worden.

Die Autoren schließen aus den Beobachtungen, dass die Orientierungen und Querbewegungen auf Normalspannungsdifferenzen im Fluid zurückzuführen sind. Wobei die Kugelgröße in dem untersuchten Größenbereich (\varnothing 250-850 μm) keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit in radialer Richtung besitzt.

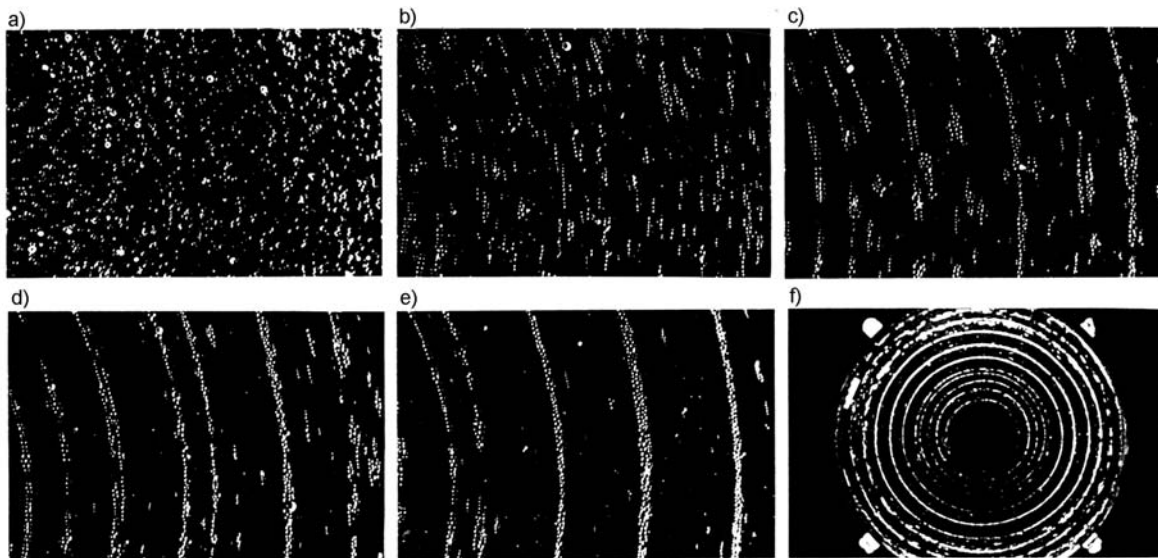


Bild 100: Ausbildung von Mikrostrukturen in einer wässrigen Lösung aus 2% Polyethylenglykol (PGK) mit 2% Kugeln. Aufnahmen von Beginn a) in Zeitabständen bis 20 min Laufdauer f) nach [FEN96]

Ergebnis der allgemeinen Betrachtung von Partikelquerbewegungen in Strömungen

Beim Magnus Effekt und Bandscherapparat-Versuch ergeben sich Querbewegungen von einzelnen starren Partikeln in einem Newtonschen Fluid, wobei sich die Querbewegung aus Integration von Normal- und Schubspannungen auf der Oberfläche des Partikels ergeben. Die Bewegungsrichtung ist abhängig von der Reynolds Zahl (Bandscherapparat) und als Ursprung für die Querbewegung kann die Existenz der sogenannten *Wake* gesehen werden, die einen Bereich der Strömungsablösung auf der Oberfläche des Körpers bezeichnet.

Der ebenso vorgestellte Coanda Effekt ist mitbestimmend für die Größe dieser Ablösezone, da er eine Ablenkung eines Fluidstromes in Richtung einer gekrümmten Oberfläche hervorruft (z. B. folgte die Strömung bedingungslos einer gekrümmten Oberfläche, so gäbe es keine Ablösezone). Durch die Ablenkung eines massebehafteten Fluidstromes resultiert eine Reaktionskraft auf die Oberfläche, die eine Querbewegung von Partikeln hervorrufen kann.

Darüber hinaus wird im Experiment von *Feng* und *Joseph* sehr deutlich die starke Auswirkung eines viskoelastischen Fluids auf die Querbewegung von starren Partikeln in einer Strömung mit Scherratengradienten gezeigt. Die zügigen Querbewegungen der Partikel werden allein der Viskoelastizität des Fluids zugeordnet. Wie sich deformierbare Partikel, z. B. makromolekulare Bestandteile wie in Bild 94 in dieser Situation verhalten, ist bisher nicht diskutiert worden und wird versuchstechnisch im nächsten Abschnitt behandelt.

7.6 Versuch zur Querbewegung von makromolekularen Bestandteilen

Für diesen Versuch wird eine Schervorrichtung mit der Möglichkeit zur Probenentnahme des gescherten Fluids konstruiert. Die Entnahme erfolgt an der Position der höchsten Scherrate, um dort die Konzentration der makromolekularen Bestandteile im Vergleich zur ungescherten Ausgangslösung zu bestimmen. Als Schergeometrie wird in Anlehnung an den RWDR ein konisch zulaufender Spalt gewählt, der zu seiner engsten Stelle symmetrisch ist (Bild 101). Die Symmetrie der Schergeometrie ist Voraussetzung, um Einflüsse unterschiedlicher Winkel auf das Fließverhalten auszuschließen. Geringste Abweichungen im Rundlauf oder Schiefstellung würden bei ungleichen Winkeln ein Fließen in axialer Richtung hervorrufen. Auf die Ausrichtung der Welle muss deshalb großen Wert gelegt werden. Ein gleichmäßiges radiales Spaltmaß von 0,05 mm wird optisch eingestellt (siehe Anhang Bild A 11). Ebenfalls führt Drall auf der Oberfläche von Welle und Schergeometrie zu einer axialen Bewegung, um dies zu verhindern, sind die Oberflächen poliert ausgeführt.

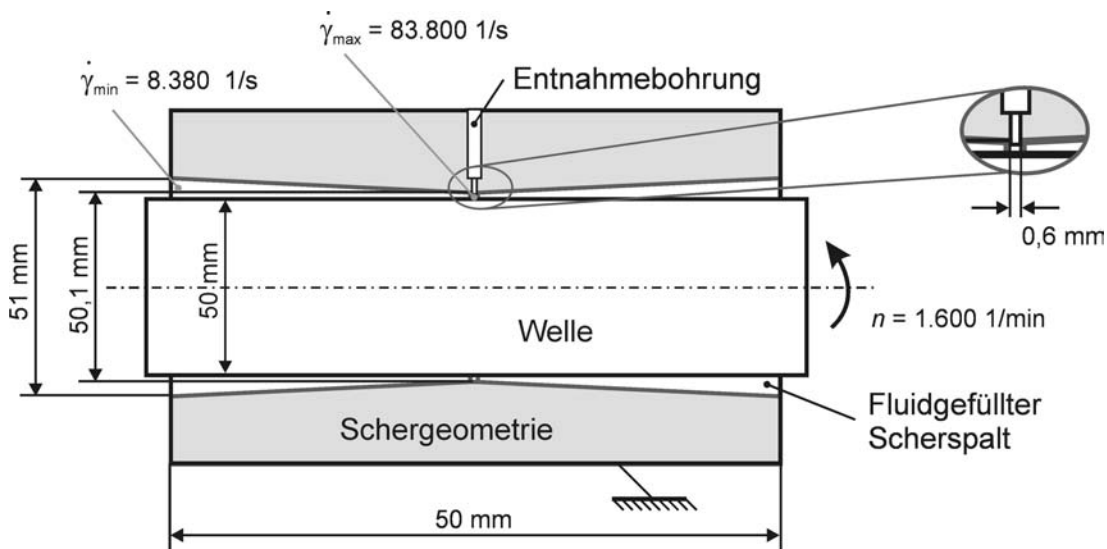


Bild 101: Schergeometrie der Versuchsanordnung

Als Versuchsfluide kommen die in Abschnitt 4.4.1 vorgestellten Lösungen eines Basisöls mit einem VI-Verbesserer zum Einsatz. Es werden keine komplett additivierten Schmierstoffe untersucht, da hier speziell das Fließverhalten von makromolekularen Substanzen analysiert werden soll. Die Wirkung von hohen Scherraten auf makromolekulare Bestandteile ist bekannt (Deformation, Ausrichtung, Aggregation, Verschlaufung), allerdings nicht die Wirkung eines Scherratengradienten auf Konzentrationsänderungen in Richtung des Gradienten.

7.6.1 Probenanalyse

Um Konzentrationsunterschiede im Fluid nachzuweisen, muss der Anteil der makromolekularen Bestandteile erfasst werden. Der zum Einsatz kommende VI-Verbesserer, welcher aus Polyalkylmethacrylate (PAMA) besteht, kann mittels der IR-Spektroskopie im Basisöl nachgewiesen werden. Die auf der Absorption von infrarotem Licht basierende Analyse-methode wird genutzt, um die Absorption von diskreten Energiemengen zu bestimmen, die bei der Anregung von entsprechenden molekularen Bausteinen erfolgt. Das verwendete Basisöl und PAMA unterscheiden sich im wesentlichen durch die Kohlenstoff/Sauerstoff-Doppelbindung im PAMA-Molekül. Die Energieabsorption steigt proportional mit der Konzentration (Bild A 12), so dass direkt aus den Analysespektren der Ausgangslösung und der Probe auf einen Konzentrationsunterschied geschlossen werden kann. Das benötigte Probenvolumen beträgt 0,15-0,2 ml, um zwei bis drei Messungen durchzuführen.

7.6.2 Vorversuche

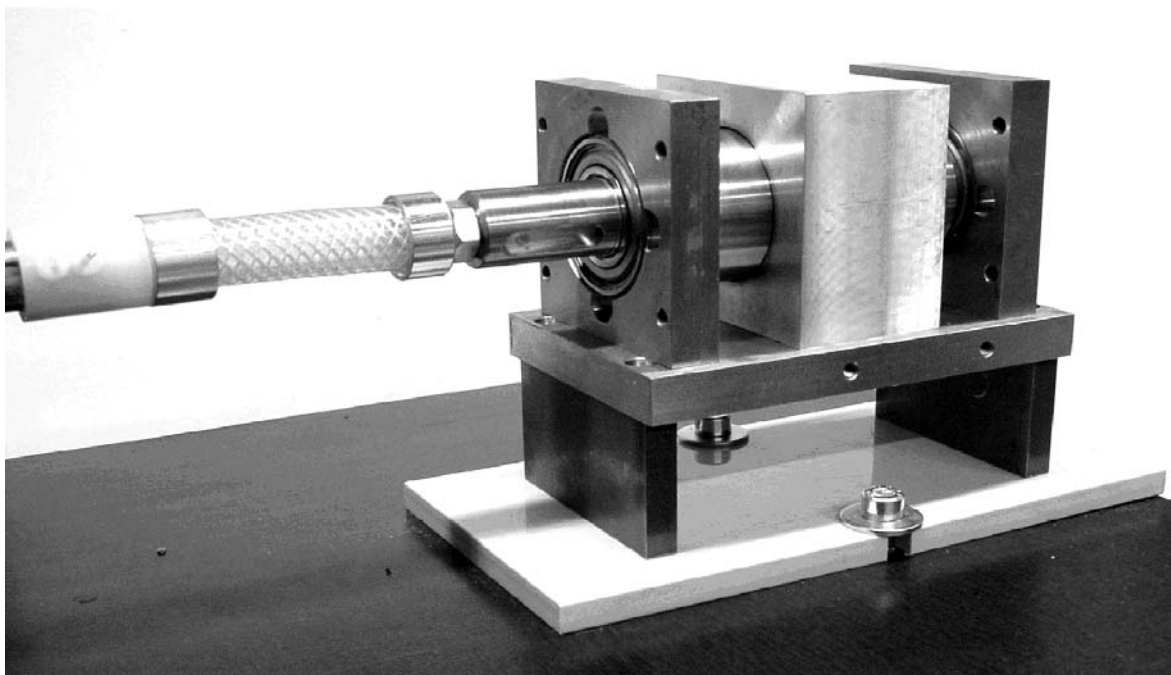


Bild 102: Montierte Schervorrichtung

In Bild 102 ist die Schervorrichtung abgebildet. Es sind Wellendrehzahlen von 50-3000 1/min möglich, wobei für die folgenden Versuche eine feste Drehzahl von 1600 1/min ausgewählt wird, da bei dieser Geschwindigkeit die Vorrichtung vibrationsarm läuft und Sekundäreinflüsse auf das Fließverhalten möglichst ausgeschlossen werden sollen. Die Scherraten bei dieser Geschwindigkeit liegen im Bereich von 8.380-83.800 1/s, respektive am weitesten und engsten Spalt. Vorversuche mit dem Scherapparat ergeben,

dass eine Abdichtung des Scherspalt in axialer Richtung nicht notwendig ist, das Fluid verbleibt bei exakter Justierung der Schergeometrie zur Welle im Spalt. Um eine Fluidprobe an der Stelle der höchsten Scherrate zu entnehmen, wird eine abgeflachte Kanüle in die Entnahmebohrung geführt und mit einer feindosierbaren Spritze eine geringe Menge Fluid entnommen (0,01-0,02 ml). Die Entnahmemenge von 0,01 ml entspricht im idealen Fall, einer Entnahmebreite von 1,2 mm an der engsten Stelle der Geometrie (Bild A 14). Diese Entnahmeweise soll sicherstellen, dass wirklich nur Fluid aus dem am stärksten gescherten Bereich entnommen wird. Da die Gesamtfüllmenge der Schergeometrie 2,17 ml beträgt (Bild A 13, Tabelle A 1), wird nur ca. 1-2% des Fluids bei einer Probe entnommen. Für die Probenanalyse mittels IR-Spektroskop wird ca. die zehnfache Menge benötigt, so dass für eine Analyse mindestens zehn einzelne Fluidproben notwendig sind.

Fluide unterliegen drei wesentlichen Abbaueffekten: mechanischer, chemischer und thermischer Abbau, deren Einfluss auf die Ergebnisse bei der gegebenen Schervorrichtung betrachtet werden muss.

Mechanischer Abbau:

Molekülsegmente werden durch mechanische Überbelastung getrennt, das heißt, durch die Scherung des Fluids werden die Schubbelastungen im Fluid so groß, dass Bindungen aufgebrochen werden. Beim vorliegenden Versuchsfluid besteht die Möglichkeit des mechanischen Abbaus nur für den VI-Verbesserer. Das Basisöl mit kleinem Molekulargewicht und einer ca. 100fach geringeren Viskosität ist viel kleineren Beanspruchungen als der VI-Verbesserer ausgesetzt. Beispielfhaft können die Viskositäten bei 100°C herangezogen werden, wobei berücksichtigt werden muss, dass der VI-Verbesserer zwecks Verarbeitbarkeit einen 40%igen Anteil von niedrigviskosem Öl enthält. ($\eta_{\text{Basisöl } 100^\circ\text{C}} = 0,003 \text{ Pa s}$, $\eta_{\text{PAMA } 100^\circ\text{C}} = 0,81 \text{ Pa s}$). Ein mechanischer Abbau würde bei der Analyse der Proben mit einem IR-Spektroskop nicht festgestellt, da sich die Anzahl der C-O-Doppelbindungen nicht verändert.

Nach *Fischer* [FSH95] besteht der mechanische Abbau bei Polyalkylmethacrylaten hauptsächlich in der Abtrennung der Seitenketten (R_i , z. B. C_7H_{15}) von der Hauptkette (Bild 33). Dadurch nimmt die Flexibilität des Makromoleküls zu und das mittlere Molekulargewicht verringert sich. Um den Einfluss des mechanischen Scherabbaus für die Schervorrichtung und Versuchsfluide zu bewerten, werden Viskositätswerte von ungescherten Proben mit gescherten Proben verglichen. Eine Verringerung der Viskosität kann nach 6 h Scherung bei einer Drehzahl von 1600 1/min nicht festgestellt werden (Bild A 15).

Chemischer Abbau:

Ein chemischer Abbau des Fluids ist in der gegebenen Schervorrichtung nicht gegeben. Die freie Oberfläche ist sehr klein (zwei Ringspalte mit einer Höhe von 1 mm)

und Wechselwirkungen zwischen der polierten Stahlwelle bzw. polierten Aluminium-Schergeometrie mit dem Fluid sind in dem zu betrachtenden Temperaturbereich ($< 100^{\circ}\text{C}$) zu vernachlässigen.

Thermischer Abbau:

Eigentlicher thermischer Abbau besteht in der Zersetzung der Substanz, wenn eine Temperatur erreicht wird, bei welcher der Energieeintrag in die chemischen Bindungen so groß ist, dass diese nicht mehr stabil sind. Zersetzungstemperaturen sinken mit steigendem Molekulargewicht, liegen aber für den eingesetzten VI-Verbesserer über 250°C [RMX00], eine Temperatur, die in der Schervorrichtung nicht erreicht wird, wie Messungen zeigen.

Temperaturmessungen an der Aluminiumoberfläche der Schergeometrie ergeben im stationären Betrieb bei 1600 1/min Temperaturen im Bereich von $37\text{--}40^{\circ}\text{C}$ für die Versuchsfluide, wobei keine signifikanten Temperaturunterschiede in Abhängigkeit der Polymeranteile gemessen werden. Dies wird einerseits auf die Messgenauigkeit der Thermometer (Messung mit Kontakt-Thermometer und kontaktlosem Infrarot-Thermometer) und andererseits auf eine verstärkte Strukturviskosität bei höherem Polymeranteil zurückgeführt.

Ob die Fluidtemperatur im Scherspalt einen Einfluss auf die Konzentrationsmessungen besitzt, soll im Folgenden abgeschätzt werden.

Fluidtemperatur in der Schervorrichtung

Der Wärmestrom aus der Fluidreibung wird nur über die Schergeometrie aus Aluminium abgeführt. Die Abgabe der Wärme an die Umgebung erfolgt durch freie Konvektion und Strahlung, wobei Wärmestrahlung mit einer geringen Temperaturdifferenz von 20 K zwischen Umgebung und Oberfläche und einem Strahlungskoeffizienten von $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ vernachlässigt werden kann (Tabelle A 2). Der wesentliche Anteil der Wärme wird durch freie Konvektion an die Umgebungsluft (ca. 20°C) abgegeben. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums führt bei einer Abschätzung des Temperaturgradienten innerhalb der Schergeometrie zu einem sehr kleinen Wert von nur $< 0,1^{\circ}\text{C}$ (Tabelle A 3). Selbst bei einer groben Abschätzung, die eine gewisse Ungenauigkeit birgt, ist dieser Wert so klein, dass von keiner signifikanten Temperaturänderung in der Schergeometrie ausgegangen wird.

Die Wärmeübertragung vom Fluid im Scherspalt auf die Schergeometrie stellt eine erzwungene Konvektion mit hohen Fluidgeschwindigkeiten auf der Oberfläche dar, die in einem sehr guten Wärmeübergang resultiert. Aufgrund der geringen Dicke des Fluidfilmes wird von einer gleichmäßigen Temperatur im Scherspalt ausgegangen und es wird keine Überhöhung der Fluidtemperatur über die der Schergeometrie angenommen.

Einfluss von Wärme auf die Polymerkonzentration

Um einen möglichen Temperatureinfluss auf die Polymerkonzentration zu erfassen, werden die Versuchsfluide über 24/48 h auf 88°C erhitzt, um anschließend die Viskositätswerte der erhitzten Proben mit den unbehandelten zu vergleichen (Bild A 16). Viskositätsänderungen der erhitzten Proben sind mit dem verwendeten Rheometer nicht zu erfassen. Auch die Ergebnisse mit dem IR-Spektroskop ergeben nur eine geringen Konzentrationszunahme nach 24 h von 1,2% und nach 48 h eine gesamte Erhöhung von 2,2%. Aufgrund der hohen Temperatur und der geringen Viskositätssteigerung wird eine Konzentrationserhöhung durch Wärmeeffekte ausgeschlossen.

7.6.3 Versuchsdurchführung und -Ergebnisse

Es werden jeweils drei Versuche pro Versuchsfluid gefahren (2,5; 5; 10; 15% PAMA-Anteil) und die Konzentration der Proben an der Stelle des höchsten Schergefälles analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 aufgeführt [MSS01]. Die angegebenen Werte sind ein Maß für die Adsorption bei einer Wellenzahl von 1733 1/cm (Kehrwert der Wellenlänge), die charakteristisch für die im PAMA enthaltene C-O-Doppelbindung ist.

Tabelle 19: IR-Konzentrationsergebnisse für Polyalkylmethacrylat-Proben

Versuchsfluid	Konzentration der Probe	Standardabweichung der Messungen	Referenz	Konzentrationsänderung
2,5% PAMA	0,0626	0,0003	0,0605	3,5%
5% PAMA	0,1257	0,0047	0,1193	5,4%
10% PAMA	0,2849	0,001	0,2766	3%
15% PAMA	0,4193	0,012	0,4187	0,1%

Die Ergebnisse zeigen eine leichte Konzentrationssteigerung der Proben mit 2,5; 5 und 10% PAMA-Anteil, wohingegen ein 15%iger Polymeranteil in diesem Scherversuch keine Erhöhung der Konzentration ergibt.

Um den Einfluss der Scherdauer auf die Konzentrationsänderung zu bestimmen, wird bei einem Versuchsfluid (5% PAMA) die Scherdauer von 30 min auf 6 h für die Probenentnahme heraufgesetzt. Die Analyseergebnisse ergeben Konzentrationsänderungen von 7% im Vergleich zu 5,4% bei der Kurzzeitprobe. Die Steigerung der Konzentrationsänderung um 1,6% ist verständlich, da das Fluid mehr Zeit für eine Umordnung besitzt.

7.6.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

Dass Querbewegungen von starren Partikeln in viskoelastischen Fluiden in Strömungen mit Scherratengradient existieren, ist versuchstechnisch von *Feng* und *Joseph* gezeigt worden (Abschnitt 7.5.3). Der vorliegende Versuch gibt Hinweise darauf, dass ebenfalls makromolekulare Bestandteile, welche die Viskoelastizität eines Fluids hervorrufen, sich unter der Wirkung eines Scherratengradienten orientieren. Diese Orientierungsneigung ist stärker als die des natürlichen Konzentrationsausgleiches im Fluid (Entropiemaximum) und der zufälligen Bewegungen molekularer Bestandteile (Brownsche Bewegungen). Die Querbewegungen von viskoelastischen makromolekularen Bestandteilen werden im Gegensatz zu starren kugelsymmetrischen Körpern zusätzlich durch Deformation, Ausrichtung, Aggregation und Verschlaufung beeinflusst.

Die Anpassung der Körperform an einen wirkenden Belastungsgradienten lässt aus einem Ellipsoiden bei gleichmäßiger Belastung (Bild 89, S. 123) einen komplexen Körper entstehen, wie es in Bild 94 dargestellt ist. Weicht ein Körper von der Rotationssymmetrie ab, sind Querbewegungen aufgrund der äußeren Form möglich (Druck- und Schubspannungen erzeugen Kräfte und Momente auf den Körper, da die Kraftwirklinien nicht mehr durch den Körperschwerpunkt laufen), falls der Körper keine chaotischen Bewegungen in der Strömung ausführt. Zusätzlich existiert in und um den belasteten Körper ein komplexer Spannungszustand. Dieser Spannungszustand ist für die makromolekularen Bestandteile in Umfangsrichtung identisch, wohingegen in axialer Richtung der Belastungsgradient wirkt. Die unterschiedlichen Spannungszustände in axialer Richtung können ebenfalls zu einer Fluidbewegung führen.

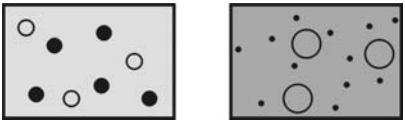
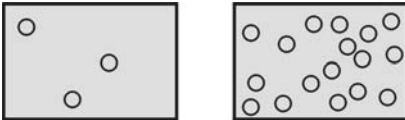
Die Orientierung der polymeren Bestandteile zum Bereich der höchsten Scherrate ist bei den vorliegenden Ergebnissen von der Konzentration abhängig, was an der Abschwächung mit zunehmender Konzentration erkennbar wird. Eine Erklärung dieses Verhaltens kann in dem zunehmenden Knäuelerfüllungsgrad gesehen werden (Tabelle 16). Der Knäuelerfüllungsgrad ist ein Maß für das von den makromolekularen Bestandteilen eingenommene Volumen in der Lösung. Die 15%ige PAMA-Lösung liegt im Grenzbereich zu einer konzentrierten Lösung. In einer konzentrierten Lösung liegen keine einzelnen makromolekularen Bestandteile vor, da die maximale Packungsdichte ohne Überlappung einzelner Knäuel überschritten ist. Somit ist eine Ausbildung von einzelnen Scherebenen, die aufeinander abgleiten und durch das Lösungsmittel getrennt werden, behindert (Bild 88). Ebenso wird die Ausbildung von viskoelastischen Scherebenen erschwert, wenn der Polymeranteil zu gering ist, da nicht ausreichend hohe Verschlaufungsdichten in den Scherebenen erreicht werden. Die 2,5%ige Lösung liegt mit einem Knäuelerfüllungsgrad von $\tilde{c} = 0,75$ im Bereich der verdünnten Lösung ($c < 1$), welches die geringere Polymerkonzentrationserhöhung der Probe im Bereich der höchsten Scherrate erklären kann.

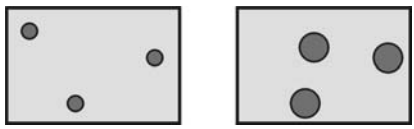
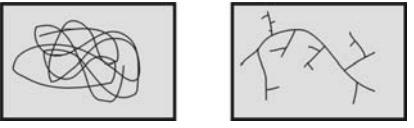
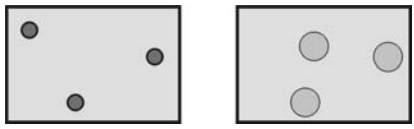
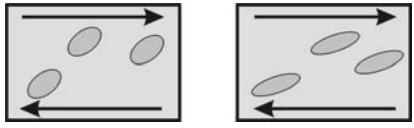
Die Analyseergebnisse aus Tabelle 19 ergeben keine großen Konzentrationserhöhungen. Die gemessenen Werte liegen an der Nachweisgrenze für die eingesetzte Technik (IR-Spektroskopie). Allerdings sind die ermittelten Konzentrationsangaben aus allen Proben (jeweils drei) und für jede Probe mit ein bis drei Messungen bestätigt. Ein systematischer Fehler, der die Konzentrationsmesswerte verkleinert, liegt in der Art der Probenentnahme vor. Die Entnahme erfolgt mit einer Kanüle an nur einer Position am Umfang. Wird in der Kanüle ein Unterdruck erzeugt, so gelangt nicht nur Fluid aus dem zentralen Bereich der Schergeometrie mit der höchsten Scherrate, sondern auch Fluid aus den angrenzenden Randbereichen mit in die Probe. Dieses Fluid ist kleineren Scherraten ausgesetzt und enthält einen geringeren Polymeranteil, was zu einer systematischen Abschwächung des Messergebnisses führt.


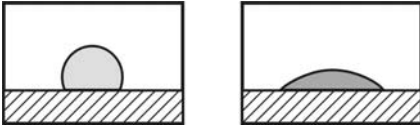
In bezug zur RWDR-Anwendung ist anzumerken, dass die eingesetzten Versuchsfluide in ihren Eigenschaften herkömmlichen Schmierfluiden entsprechen, allerdings befinden sich die im Versuch erzielten Scherraten um Größenordnungen unter den Scherraten in der Dichtzone von RWDR. Ergibt sich unter diesen Versuchsbedingungen ein Konzentrationsgradient, so ist anzunehmen, dass dieser bei stärkerer Scherung und ausgeprägteren Normalspannungsdifferenzen stärker hervortritt.

Die vorliegenden Ergebnisse sind mit einem gewöhnlichen VI-Verbesserer erzielt worden, der nicht für diese Art von Scherversuch optimiert ist. Für weiterführende Versuche besteht die Möglichkeit, die Einflüsse von Fluidparametern auf die Querbewegung der makromolekularen Bestandteile zu untersuchen, um dieses Phänomen zu quantifizieren. In Tabelle 20 sind diese Parameter mit Erläuterung vorgestellt.

Tabelle 20: Fluidparameter mit Einfluss auf Querbewegungen nach [WIE00b]

Fluidparameter	
<u>Zusammensetzung des Fluids</u>	
Die einzelnen Fluidkomponenten, wie Lösungsmittel (z. B. Basisöl) und Zusätze bestimmen entscheidend das Fluidverhalten.	
<u>Konzentration der Fluidkomponenten</u>	
Die Konzentration c der Fluidbestandteile besitzt ebenso wie die einzelnen Fluidkomponenten einen wesentlichen Einfluss auf das Fließverhalten.	

<u>Molekulargewicht</u>	
Das Molekulargewicht dient als Größeninformation für einen Fluidbestandteil.	
<u>Verzweigungsgrad</u>	
Um die Ausmaße eines Moleküls exakt beschreiben zu können, ist es wichtig, den Verzweigungsgrad zu kennen. Eine hohe Verzweigung ergibt bei gleichem Molekulargewicht ein kompakteres Gesamtmolekül als bei niedriger Verzweigung.	
<u>Löslichkeit/Staudinger Index/Intrinsische Viskosität</u>	
Die Löslichkeit beeinflusst, in welcher Form und Größe die Additive im Lösungsmittel vorliegen. Löslichkeit (Eindringen von Lösemittel in den Aufenthaltsbereich des Makromoleküls) und Temperatur besitzen einen wesentlichen Einfluss auf das insgesamt vom Makromolekül umschlossene Volumen, was an der Wirkungsweise von VI-Verbesserern beispielhaft gesehen werden kann.	
<u>Deformationsfähigkeit, Ausrichtung</u>	
Das Deformationsverhalten eines Moleküls wird durch die Beweglichkeit seiner Bindungen (Bindungswinkel) und Struktur (Verzweigungsgrad) bestimmt. Hentschel [HNT87] hat eine aufschlussreiche Arbeit vorgestellt, in der unterschiedliches Reibungsverhalten auf die molekulare Struktur zurückgeführt werden kann. Die Flexibilität von Seitenketten besitzt einen wichtigen Einfluss. Ebenso hat das Molekulargewicht einen entscheidenden Effekt auf das Deformationsverhalten, denn ein großes Molekül besitzt erheblich mehr Möglichkeiten auf eine Beanspruchung zu reagieren, als ein Kleines. Das Deformationsverhalten in Abhängigkeit von der Scherrate besitzt Einfluss auf die Normalspannungseigenschaften.	

<u>Verschlaufungsneigung</u>	
<p>Einen besonders wichtigen Einfluss auf das Verhalten im Scherspalt hat die Interaktion der Makromoleküle untereinander. Tabor [TAB82] erwähnt, dass Verschlaufungen zwischen Molekülen ab einer Kettenlänge von 500 C-Atomen vorkommen, das entspricht einem Molekulargewicht einer Kohlenwasserstoffkette von ca. 6.000 g/mol. Handelsübliche VI-Verbesserer besitzen Molekulargewichte im Bereich von 5.000 – 1.000.000 g/mol [KDA90, LUB94]. Die Verschlaufungen beeinflussen stark das viskoelastische Verhalten des Fluids, da sie eine viskoelastische Verbindung zwischen den einzelnen Makromolekülen sind. Der viskose Anteil kann anschaulich mit dem Entschlaufen erklärt werden. Hierbei werden Kettensegmente aus anderen Makromolekülen herausgezogen. Dieser Vorgang ist stark geschwindigkeitsabhängig. Der bei jeder belasteten Verschlaufung auftretende elastische Anteil besteht in der Dehnung/Streckung der kovalenten Bindungen/Ketten.</p>	
<u>Benetzung</u>	
<p>Der Grad der Benetzung besitzt entscheidenden Einfluss auf die Existenz von Fluid in kleinen Spalten. Eindringen von Fluid kann durch nicht benetzende Fluide verhindert werden. Benetzte Oberflächen können an sich eine Normalbelastung aufnehmen und erleichtern den Aufbau eines tragenden Fluidfilmes.</p>	

7.6.5 Indiz für die Funktionshypothese von *Oliveira*

Die Dicht- und Schmierungshypothese von *Oliveira* geht im Förderzustand von einer Akkumulation der Normalspannungsdifferenzen auf der Bodenseite der Dichtzone aus, die zu einer Fluidbewegung in Richtung Stirnseite führt (Abschnitt 2.2.3). Durch den vorgestellten Versuch ist es gelungen, Hinweise für die Gültigkeit dieser Hypothese zu finden. Die Konzentrationsänderungen werden durch Kräfte quer zur Fließrichtung, resultierend aus den Normalspannungsdifferenzen, hervorgerufen, die in einer asymmetrischen Versuchsanordnung zu einer kompletten Fluidbewegung führten. Dies wird anschaulich, wenn die Summen der Normalspannungsdifferenzen der boden- und stirnseitigen Bereiche miteinander verglichen werden.

In Bild 103 ist ein vereinfachter Querschnitt einer Dichtlippe dargestellt. Deutlich sind die unterschiedlichen Kontaktwinkel der Seitenbereiche zu erkennen (Stirnseite: $\alpha = 45^\circ$, Bodenseite: $\beta = 15^\circ$). Um die unterschiedliche Wirkung der Kontaktwinkel anschaulich hervorzuheben, werden nur die Randbereiche der Dichtzone betrachtet. Für diese Betrachtung wird deshalb im eigentlichen Dichtzonenbereich eine gleichmäßige Fluidfilmdicke

angenommen. Um zu zeigen, welche elastischen Kräfte sich während eines Fördervorganges auf der Bodenseite im Verhältnis zur Stirnseite akkumulieren, werden identische minimale und maximale Fluidfilmdicken für die beiden Seitenbereiche festgelegt (minimale Fluidfilmdicke in den Seitenbereichen am Übergang zur Dichtzone und für die Abgrenzung des Bereiches in Richtung kleiner Scherraten, eine maximale Fluidfilmdicke über die hinaus keine signifikanten Normalspannungsdifferenzen auftreten). So ergibt sich hieraus in Abhängigkeit der Kontaktwinkel ein unterschiedliches Volumen der Seitenbereiche. Bei den gegebenen Winkeln beträgt der Quotient der Volumina auf Boden- und Stirnseite $V_{BoSe} / V_{StiSe} = \tan \alpha / \tan \beta = 3,7$. Da die gescherten Volumina auf Boden- und Stirnseite identische Geometrien besitzen und die Normalspannungen als proportional zum Quadrat des Kehrwertes der Fluidfilmdicke angenommen werden, gilt näherungsweise für die akkumulierten Normalspannungsdifferenzen:

$$\int_{BoSe} N_i dz \bigg/ \int_{StiSe} N_i dz = (\tan \alpha / \tan \beta)^2 = 14$$

(dazu F 12, S. 111).

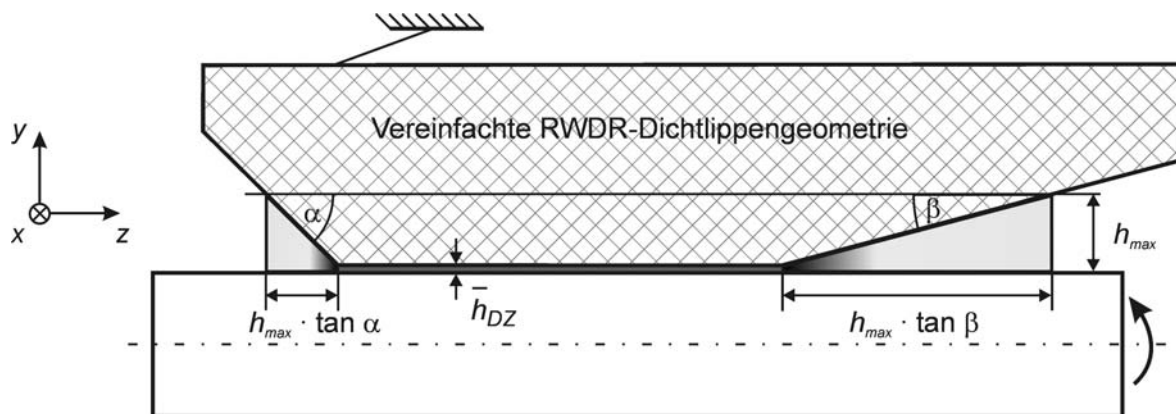


Bild 103: Boden- und stirnseitige Bereiche mit Normalspannungsdifferenzen während des Förderbetriebs

Auf der Bodenseite existieren während der Förderung um ein Vielfaches höhere Normalspannungsdifferenzen als auf der Stirnseite. Wenn davon ausgegangen wird, dass Normalspannungsdifferenzen eine Querbewegung von Fluid in Richtung einer höheren Scherrate verursachen, resultiert aus der Betrachtung der Normalspannungsdifferenzen bei einem Fluidvorkommen auf der Bodenseite eine Fluidbewegung in Richtung Stirnseite, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den beiderseitig aufsummierten Normalspannungsdifferenzen einstellt.

7.6.6 Erweitertes Folienmodell

Aus den vorgestellten Versuchsergebnissen und Diskussion lässt sich das *erweiterte Folienmodell* mit Berücksichtigung eines Scherratengradienten ableiten. Die höhere

Belastung des Fluids in der Mitte der Geometrie führt zu stärkeren elastischen Kräften (Normalspannungsdifferenzen), welche zu einem Konzentrationsgradienten in Richtung des Scherratengradienten führt (schwarze Pfeile). Dies ist schematisch in Bild 104 für fünf Scherebenen in Anlehnung an Bild 87 dargestellt. In der eingesetzten Schergeometrie beträgt der Spaltöffnungswinkel ca. 1° (Winkeldarstellung in Bild 104 ist stark überhöht). Ist der Winkel klein und existiert nur eine geringe Anzahl von Fluidschichten (RWDR-Dichtzone), so wird die Anzahl der Scherebenen in den Bereichen hoher und kleinerer Scherraten nicht wesentlich variieren, da eine Anpassung der Höhe von einzelnen Fluidschichten durch Deformation und Ausrichtung der Fluidbestandteile in der Strömung erfolgt (Abschnitt 7.1). Die einzelnen Ebenen können wie aufeinander abgleitende elastische Folien betrachtet werden, wobei die Dicke der Folie umgekehrt proportional der Belastung ist.

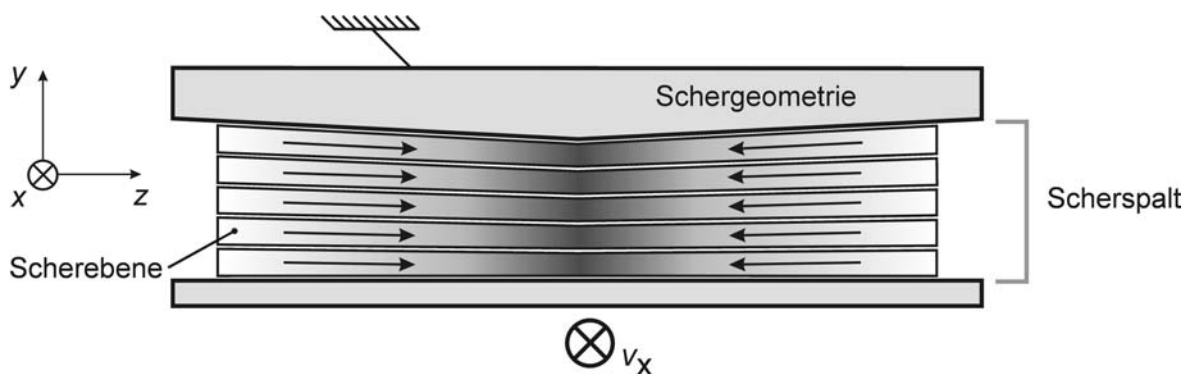


Bild 104: Erweitertes Folienmodell

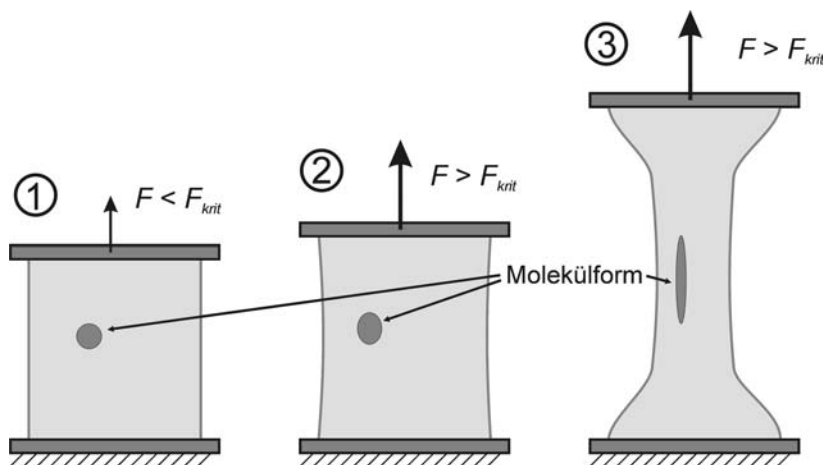


Bild 105: Plastische Verformung einer zugbelasteten Folie

Ein sehr anschauliches Beispiel stellt die Zugbelastung einer einzelnen rechteckigen Folie dar, die an ihren Enden eingespannt ist (Bild 105). In Zustand 1 ist die Kraft so gering, dass keine plastische Verformung auftritt. Überschreitet die Kraft eine kritische Grenze, so

beginnt die plastische Verformung und eine leichte Einschnürung wird in den Seitenbereichen sichtbar (Zustand 2). Wirkt diese Kraft über einen längeren Zeitraum bzw. wird sie noch gesteigert, so folgt eine stärkere Einschnürung (Zustand 3). Die Art der Folienverformung lässt auf die Deformation der makromolekularen Bestandteile in der Folie schließen. Durch die Einschnürung der Folie erfolgt eine Ausrichtung der molekularen Struktur wie in Bild 105 angedeutet. Diese Molekülformen können analog zu den makromolekularen Bestandteilen in viskoelastischen Fluiden gesehen werden, die ebenso mit zunehmender Belastung eine verstärkte Deformation und Ausrichtung erfahren.