

Steffen Schneider

# Methoden zur Charakterisierung elektrorheologischer Suspensionen unter besonderer Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Heft Mai 2007 Bericht aus dem Institut für Mechanik Steffen Schneider

Alle Rechte, insbesondere die Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne Genehmigung des Autors ist es nicht gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise auf fotomechanischem, elektronischem oder sonstigem Wege zu vervielfältigen.

Herausgeber:

Institut für Mechanik Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr Hamburg Hamburg, 2007. ISSN 0939-2343

- Gedruckt mit Unterstützung der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg -

# Methoden zur Charakterisierung elektrorheologischer Suspensionen unter besonderer Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Von der Fakultät für Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION vorgelegt von

Steffen Schneider

aus Borna

Hamburg 2007

Berichterstatter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gert Böhme Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

#### Vorwort

Ich möchte mich bei allen, welche mich bei dieser Arbeit durch ihr persönliches Engagement unterstützt haben, in gleichem Maße bedanken. Jeder einzelne Beitrag war für das Gelingen dieser Arbeit notwendig.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. rer. nat. G. Böhme. Durch seine wertvollen Hinweise kann diese Arbeit an vorhergehende anschließen und sich von diesen abheben. Mein Dank geht ebenso auch an Prof. Dr.-Ing. R. Bruns für seine Tätigkeit als zweiter Berichterstatter.

Meine Eltern haben mich auf meinen Weg gebracht. Dr. G. Kohlhaas hat mich bei meinem Dienstantritt im Institut ermutigt, wissenschaftlich tätig zu werden. Meine Vorgesetzten Dr. P. Bartl und Dr. W. Seßler haben mich immer wieder motiviert und mir ihr Vertrauen sowie den Freiraum für meine Forschungen gegeben. Ohne die gewissenhafte, sachkundige Unterstützung von vielen Institutsmitarbeitern hätte ich meine wissenschaftlichen Untersuchungen nie betreiben können. Stellvertretend möchte ich Dr. S. Eibl und F. Hoffmann nennen, welche mit mir immer wieder Fragen der chemischen und mathematischen Analytik diskutierten.

Unterstützt wurde diese Arbeit auch von mehreren Praktikanten. Stellvertretend möchte ich an dieser Stelle A. Eichenberg von der TU Chemnitz und M. Budig von der Universität der Bundeswehr München nennen. Am IFAS der RWTH Aachen war M. Zaun ebenfalls auf dem Gebiet der Elektrorheologie tätig. Die Diskussionen mit ihm haben meine eigene Tätigkeit immer wieder sehr befruchtet.

Meine Ehefrau Ines stand mir familiär und mit ihrer eigenen beruflichen Erfahrung stets motivierend zur Seite. Letztendlich war ihre Promotion für mich der entscheidende Anstoß, meine eigenen wissenschaftlichen Aktivitäten in einer Dissertation zusammen zu fassen.

Ohne Gebet und das Vertrauen auf meinen Herrn Jesus Christus wäre diese Arbeit niemals möglich gewesen.

Gelobt sei Gott, der mein Gebet nicht verwirft noch seine Güte von mir wendet.

[Psalm 66,20]

#### KURZFASSUNG

Bisherige Arbeiten auf dem Gebiet der ERF hatten meist die Entwicklung einer technischen Applikation zum Schwerpunkt oder haben sich speziell mit einer einzelnen Methode befasst. Jedoch fehlen bis heute einheitliche Methoden zur Charakterisierung von elektrorheologischen Flüssigkeiten. Mit dieser Arbeit soll ein Überblick über gebräuchliche Methoden zur Charakterisierung von elektrorheologischen Suspensionen gegeben werden, auch, um als Grundlage für eine spätere Normung dienen zu können.

Das Verhalten der Viskosität als Funktion der Temperatur unter Einfluss eines angelegten Steuerfeldes wurde bisher lediglich für homogene elektrorheologische Flüssigkeiten und für magnetorheologische Flüssigkeiten untersucht. In dieser Arbeit sind elektrorheologische Suspensionen einer derartigen Betrachtung unterworfen worden. Dabei wurde festgestellt, dass die Viskosität bei angelegtem elektrischen Feld zunächst mit der Temperatur ansteigt, wogegen die Viskosität ohne angelegtes elektrisches Feld in Analogie zu konventionellen Ölen mit steigender Temperatur abfällt. Bei ER-Suspensionen, die Lithiumchlorid enthalten, oder einer entsprechenden Mischung wurde weiterhin festgestellt, dass bei Überschreitung einer spezifischen Temperatur die Viskosität wieder abfällt. Für jede ER-Suspension konnte in Abhängigkeit von Temperatur und Feldstärke eine maximale Viskosität gemessen werden. Das Temperaturverhalten elektrorheologischer Suspensionen wird dabei hauptsächlich durch die in der Formulierung enthaltenen Salze bestimmt. Während ER-Suspensionen, welche Lithiumchlorid enthalten. ihre optimale Einsatztemperatur bereits bei Temperaturen zwischen 40°C und 60°C erreichen, liegt der optimale Temperatureinsatzbereich für ER-Suspensionen mit Zinkchlorid, oberhalb 80°C. Ungeachtet dessen erreichen beide Arten bei gleicher Feldstärke auch etwa gleiche Viskositäten.

Bekannt ist, dass elektrorheologische Suspensionen im Rotationsrheometer einer anderen Beanspruchung unterliegen als im Kapillarrheometer oder im Fließkanal. Die Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres übertragbar. Eine Ursache dafür ist, dass bisher das Fließverhalten elektrorheologischer Suspensionen ohne

Einfluss eines elektrischen Steuerfeldes als newtonsches Fließverhalten betrachtet und das Fließverhalten unter Feldeinfluss im allgemeinen mit dem BINGHAM-Modell erklärt wurde. Aufbauend auf vorhandenen Verfahren wird in dieser Arbeit schrittweise eine neue Methodik zur Ermittlung der Wandschubspannung entwickelt. Erstmalig werden dabei auch gezielt Methoden der Suspensionsrheologie angewandt. Schwerpunkt dieser Arbeit sind somit Untersuchungen zum Fließverhalten elektrorheologischer Suspensionen in Kapillaren unterschiedlicher Geometrie bei Variation der elektrischen Feldstärke und der Betriebstemperatur.

Bei der Auswertung der gewonnenen Ergebnisse wurde festgestellt, dass die quasistatisch aufgenommenen Fließkurven einer Kombination von Korrekturen zu unterziehen sind:

- Korrektur der Ein- und Auslaufdruckverluste nach BAGLEY,
- Korrektur des unbekannten Fließverhaltens nach WEISSENBERG / RABINOWITSCH,
- Korrektur des Wandgleitens nach MOONEY.

Ein weiteres Kriterium für den Einsatz von ER-Suspensionen ist die Stromaufnahme bzw. Stromdichte. Die Stromdichte fällt mit steigender Schergeschwindigkeit, schwillt jedoch mit steigender Temperatur an. Die Stromaufnahme ist weiterhin proportional zur Spaltlänge. Zusammen mit der Steuerfeldspannung bestimmt die Stromaufnahme den Leistungsbedarf der erforderlichen Hochspannungsquelle.

Eine elektrophysikalische Charakterisierung von ERF ist mit genormten Verfahren möglich. Das Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen wird wesentlich vom Dichteverhältnis zwischen Grundöl und suspendierten Partikeln bestimmt. Die Sinkgeschwindigkeit der Partikel steigt mit ihrer Größe und der Temperatur. Die durchgeführten chemischen Analysen dienten zur Klärung der Zusammensetzung sowie der ablaufenden Prozesse in der ER-Suspension bei Ansteuerung mit einem elektrischen Feld und in Abhängigkeit von der Temperatur.

### I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1	Einleitung		1
1.1 Technischer Hintergrund		1	
	1.2	Relevante Literatur und technische Applikationen	3
	1.2.1	Relevante Literatur	3
	1.2.2	Kennfelddämpfer für verschiedene Anwendungen	6
	1.2.3	Hochdynamischer elektrorheologischer Servoantrieb	7
	1.2.4	Adaptronisches Transportsystem	9
	1.2.5	Schockschutz von Bauwerken	9
	1.2.6	Kupplungen und Bremsen	. 10
	1.2.7	Elektrorheologische Lenkhilfe	. 11
	1.3	Motivation, Ziel und Abgrenzung der Arbeit	. 12
2	Tł	neoretische Grundlagen	. 15
	2.1	Theorien zur Beschreibung des ER-Effektes	. 15
	2.2	Strömungsformen	. 17
	2.2.1	Hauptbeanspruchung Scheren	. 17
	2.2.2	Hauptbeanspruchung Fließen	. 18
	2.2.3	Hauptbeanspruchung Quetschen	. 18
	2.3	Rheologische Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von ERF	. 19
	2.3.1	Newtonsche Flüssigkeiten	. 19
	2.3.2	Nicht-newtonsche Flüssigkeiten	. 20
	2.3.3	Weitere Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens	. 22
	2.4	Charakteristische Eigenschaften von ERF	. 25
	2.4.1	Kennwerte zur Charakterisierung einer ERF	.25
	2.4.2	Anforderungen an eine ERF	. 26
	2.5	Untersuchte Produkte und deren Kenndaten	. 27
3	RI	neologische Charakterisierung mittels Rotationsrheometer	. 32
	3.1	Elektrorheologiemessplatz	. 32
	3.1.1	Vorbemerkungen	. 32
	3.1.2	Koaxiales Rotationsrheometer mit ER-Option und Temperiermöglichkeit	. 32
	3.1.3	Hochspannungsversorgung	. 33
	3.1.4	Messgeometrie	. 35
	3.2	Temperaturverhalten von elektrorheologischen Flüssigkeiten	. 37
	3.2.1	Bestimmung der Basisviskosität der ER-Suspensionen	. 37

Inhaltsverzeichnis

	3.2.2	Verhalten von ER-Suspensionen bei Einfluss eines elektrischen Feldes.	. 38
3.2.3		Verhalten von homogenen ERF bei Einfluss eines elektrischen Feldes	. 51
	3.2.4	Betrachtung zum Temperaturverhalten elektrorheologischer	
		Suspensionen im Vergleich mit bekannten Modellen	. 53
4	RI	heologische Charakterisierung mittels Fließkanaluntersuchung	. 56
	4.1	Verwendete Prüfeinrichtungen	. 56
	4.1.1	Hydraulikprüfstand	. 56
	4.1.2	Ventilgeometrien	. 58
	4.1.3	Steuerung und Messdatenerfassung	. 61
	4.2	Vorbetrachtungen zu den experimentellen Untersuchungen	. 63
	4.2.1	Berechnungsformeln zur Auslegung von ER-Strömungswiderständen	. 63
	4.2.2	Weiterführende Betrachtungen zu Messungen mit Kapillarviskosimetern	. 66
	4.2.3	Einlauf- und Auslaufdruckverluste	. 69
	4.3	Methodik zur Aufnahme von Fließkurven	. 73
	4.3.1	Vorgabe einer konstanten Feldstärke bei Variation des Volumenstroms.	. 73
	4.3.2	Vorgabe eines konstanten Volumenstroms bei Variation der Feldstärke	. 78
	4.3.3	Vorgabe von konstantem Volumenstrom und konstanter Feldstärke	. 80
	4.4	Wandgleiten	86
	4.4.1	Grundlegende Betrachtungen auf Basis der bisherigen Erkenntnisse	. 86
	4.4.2	Ansatz zur Ermittlung des Wandgleitens	. 87
	4.4.3	Nachweis des Wandgleitens durch eigene Messungen	. 90
	4.5	Ermittlung weiterer charakteristischer Kennwerte im Fließkanal	. 92
	4.5.1	Viskosität	. 92
	4.5.2	Bestimmung elektrischer Kennwerte	. 94
	4.5.3	Ansprechzeit	96
5	CI	harakterisierung weiterer Materialeigenschaften	. 98
	5.1	Elektrophysikalische Charakterisierung	. 98
	5.2	Bestimmung der Dichte	100
	5.3	Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen	102
	5.4	Analytische Charakterisierung	105
	5.4.1	IR-Spektroskopie und begleitende Untersuchungen	105
	5.4.2	Atomabsorptionsspektroskopie	108
	5.4.3	Thermische Analyse zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur vor	I
		Polyetherurethanpartikeln	109
	5.4.4	Röntgenfluoreszenzanalyse	109
	5.4.5	Spektroskopie im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich	110

5.4.	6 Bisheriger Wissensstand zur Polarisierung von ER-Suspensionen 110
5.4.	7 Interpretation der Ergebnisse aus der analytischen Charakterisierung113
5.5	Verträglichkeit mit anderen Stoffen116
5.6	Beobachtungen aus dem Gebrauch von ERF116
6	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse
7 Ausblick1	
Quellen	/erzeichnis

### FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm <sup>2</sup>	Fläche
В	mm	Breite
B <sub>magn</sub>	Т	magnetische Flussdichte
С	F	Kapazität
D	1/s	Schergeschwindigkeit
Da	m	äußerer Durchmesser
D <sub>i</sub>	m	innerer Durchmesser
D <sub>m</sub>	m	mittlerer Durchmesser
d <sub>Part</sub>	m	Partikeldurchmesser
Ds	1/s	scheinbare Schergeschwindigkeit
D <sub>w</sub>	1/s	wahre Schergeschwindigkeit
E	V/m	elektrische Feldstärke
<b>e</b> <sub>0</sub>	-	Verschiebungsfaktor
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
Н	m	Höhe
Ι	Α	Stromstärke
J	A/m <sup>2</sup>	Stromdichte
К	Pa s <sup>n</sup>	Konsistenzparameter
k	J/K	Boltzmann-Konstante
L	m	Länge
m	kg	Masse
n	-	Fließindex, Exponent
р	bar = 10 <sup>5</sup> Pa	Druck
Q	m³/s	Volumenstrom
S	-	Schaltziffer
Т	К	absolute Temperatur
t	S	Zeit
Tg	°C	Glasübergangstemperatur
U	V	Spannung
V	m/s	Geschwindigkeit
W	-	Wirksumme

Symbol	Einheit	Bedeutung
W <sub>Stokes</sub>	m/s	stokessche Sinkgeschwindigkeit
x, y, z	m	kartesische Koordinaten
$\Delta y$	m	Abstand zwischen Strömungsschichten / Ebenen
$\Delta \vartheta$	K	Temperaturdifferenz
Δρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichteunterschied zwischen Partikel und Trägerflüssigkeit
tan δ	-	dielektrischer Verlustfaktor
3	F/m	Dielektrizitätskonstante
ε <sub>0</sub>	F/m	elektrische Feldkonstante
ε <sub>r</sub>	-	Dielektrizitätszahl
γ	1/K	Volumenausdehnungskoeffizient
θ	°C	Celsius-Temperatur
η	mPa s	dynamische Viskosität
$\eta_{B}$	mPa s	BINGHAM-Viskosität
η <sub>c</sub>	mPa s	CASSON-Viskosität
π	-	Kreiskonstante
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
ρ	$\Omega$ m	spezifischer elektrischer Widerstand
σ	S/m	elektrische Leitfähigkeit
τ	Pa	Wandschubspannung
τ <sub>E</sub>	Pa	dynamische ER-Fließspannung
$\tau_0$	Ра	Fließgrenzspannung
Abkürzung		Bedeutung
ATR		abgeschwächte Totalreflexion
CR		Controlled Rate
CS		Controlled Stress
EDX		Energy Dispersive X-ray Analysis
eff		Effektivwert
ER		elektrorheologisch
ERF		elektrorheologische Flüssigkeit
FKM		Fluor-Polymer-Kautschuk (z.B. Viton)
HMMWV		High Mobility Multi-purpose Wheeled Vehicle
IFAS		Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen
IR		infrarot

Abkürzung	Bedeutung
ISC	Institut für Silikatforschung
MA	Massenanteil
max	Maximalwert
MR	magnetorheologisch
MRF	magnetorheologische Flüssigkeit
NBR	Nitrile Butadiene Rubber (Nitrilkautschuk)
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NMW	Neue Materialien Würzburg GmbH
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFA	Röntgenfloureszenzanalyse
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
UV	ultraviolett
VI	Viskositätsindex
VIS	visible

#### 1 EINLEITUNG

#### 1.1 Technischer Hintergrund

Der elektrorheologische Effekt ist seit 1949 bekannt [Win1]. Seitdem erfolgte von Seiten der Industrie eine ständige Weiterentwicklung von elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERF).

ERF sind dem großen Gebiet der multifunktionalen Werkstoffe zuzuordnen, für die auch Begriffe wie "intelligente Strukturen" bzw. "Smart Materials" gebräuchlich sind. Neben piezoelektrischen Elementen, Bimetallen, Formgedächtnislegierungen und vielen anderen Werkstoffen bzw. Bauweisen adaptiver Strukturen wird der Einsatz von ERF in neuartigen Aktoren zu einem bedeutenden Technologiesprung führen. Einen Überblick über den technischen Einsatz derartiger Aktoren gibt JENDRITZA [Jen1].

ERF wurden bisher größtenteils nur im Labor hergestellt und experimentell untersucht. Jedoch existieren bereits auch diverse Demonstratoren und Prototypen. Für spezielle Problemstellungen sind bereits serienreife Produkte im Einsatz. Beispiele für den Einsatz von elektrorheologischen Flüssigkeiten werden unter Punkt 1.2 aufgeführt.

Bei ERF handelt es sich vorrangig um Suspensionen fester, polarisierbarer, nichtmetallischer, hydrophiler Teilchen in elektrisch nicht leitenden Ölen oder Lösemitteln. Trägerflüssigkeiten sind dabei Silikon- oder Mineralöle. Die Festkörperpartikel sind zumeist polymeren Ursprungs. Ihr Durchmesser beträgt ca. 0,1 - 50 µm, ihr Massenanteil in der Suspension liegt bei ca. 45 - 55 %. Neben ER-Suspensionen existieren weiterhin noch homogene ERF auf der Basis von oligomeren Karbonsäuren in Mineralöl. Die Viskosität dieser Flüssigkeiten kann unter Einfluss eines elektrischen Feldes innerhalb weniger Millisekunden von dünnflüssig bis fest reversibel geändert werden. Beim Einschalten des elektrischen Feldes "erstarrt" die Flüssigkeit aufgrund von Polarisationseffekten, nach Ausschalten des Feldes wird die Suspension wieder dünnflüssig (Bild 1). Da der elektrorheologische Effekt unabhängig vom Vorzeichen der Polarität des elektrischen Feldes ist, kann die Anregung der ERF sowohl mit Gleich- als auch

mit Wechselspannung erfolgen. Voraussetzung zur Steuerung der ERF sind relativ hohe Feldstärken von einigen 1000 V/mm, (ca. 2 - 6 kV/mm), jedoch werden generell nur minimale Stromstärken (ca. 2 – 10 mA) benötigt. So bleiben die Steuerleistungen im Bereich weniger Watt.



Bild 1: Elektrorheologische Flüssigkeit zwischen zwei Elektroden [Fraunhofer ISC Würzburg]

Als Haupteinsatzgebiete der ERF können zunächst die Schwingungsdämpfung und die Übertragung von Drehmomenten in Kupplungen genannt werden. Der Einsatz von ERF ist jedoch auch in Hydraulikventilen möglich. Dabei wird das Druckgefälle im Ventil durch das Anlegen eines elektrischen Feldes variiert.

Neben ERF existieren gleichwertig auch magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF), bei welchen das Fließverhalten durch Anlegen eines magnetischen Feldes geändert werden kann. MRF weisen im Vergleich zu ERF höhere Dichten, Basisviskositäten <sup>1</sup> und Partikelkonzentrationen auf. Sie sind allerdings auch in der Lage, höhere Schubspannungen zu übertragen.

Wesentliche Eigenschaften, Unterscheidungsmerkmale und Angaben zur Zusammensetzung sind in Bild 2 zusammengefasst.

Generell gilt, dass ERF und MRF über weite Bereiche ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die wahlweise Verwendung von ERF und MRF ist letztlich von den konkreten Einsatzbedingungen abhängig. Ihre Eignung haben beide Flüssigkeits-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Basisviskosität: Viskosität einer ERF/MRF ohne Einfluss eines einwirkenden elektrischen / magnetischen Feldes

typen inzwischen bereits mehrfach in technischen Applikationen unter Beweis gestellt.



#### Bild 2: Wesentliche Eigenschaften und Unterscheidungsmerkmale intelligenter Flüssigkeiten

#### 1.2 Relevante Literatur und technische Applikationen

#### 1.2.1 Relevante Literatur

Nach der Entdeckung des elektrorheologischen Effektes durch WINSLOW [Win1] setzte weltweit die Forschung auf dem Gebiet der ERF ein. Im Rahmen dieses Abschnittes wird ein Überblick über die wichtigsten Arbeiten zur aktuellen Forschung auf dem Gebiet der ERF gegeben.

RECH behandelte in seiner 1996 vorgelegten Arbeit mit Aktoren elektrorheologischen Flüssigkeiten [Rch1]. Dazu untersuchte er das Verhalten von ERF im Scher-, Fließ- und Quetschmodus, ohne jedoch explizit auf den Einfluss der Temperatur einzugehen. Weitere Schwerpunkte seiner Arbeit waren Untersuchungen wegweisende zur Auslegung von ERF-Energiestellern (Hochspannungsquellen für ERF) und die Konzeption eines ERF-Hilfsmassedämpfers.

ABU-JDAYIL schloss 1996 seine Untersuchungen an ERF ab [Abu1]. Er untersuchte das Fließverhalten von zwei experimentellen und einer kommerziellen ERF mit einem Rheometer, im Fließkanal und in einer Platte-Platte-Anordnung. Schwerpunktmäßig untersuchte er den Einfluss von Gleich- und Wechselfeldern auf den elektrorheologischen Effekt. Weiterhin analysierte er den Einfluss verschiedener Oberflächenbeschichtungen sowie der Elektrodengeometrie. Herausragend waren seine Messungen von Geschwindigkeitsprofilen im rechteckigen Fließkanal mittels Laser-Doppler-Anemometrie.

WOLFF-JESSE legte 1997 mit seiner Arbeit [Wol1] den Grundstein zur Untersuchung des Fließverhaltens von ERF an der RWTH Aachen. Bei der Untersuchung von Einflussgrößen auf den elektrorheologischen Effekt ging er auch kurz auf den Einfluss der Temperatur ein. Weiterhin beschrieb er in seiner Arbeit den Einsatz von ERF in einem geregelten ER-Zylinderantrieb. Wegweisend war auch seine zusammen mit FEES vorgelegte Untersuchung des Fließverhaltens zur Simulation des Fließverhaltens von ERF [Wol2].

Eine viel zitierte Arbeit ist die von SCHWARZ aus dem Jahr 1997 [Swz1]. Auch er verband rotationsrheometrische Untersuchungen mit Fließkanaluntersuchungen zur rheologischen Charakterisierung von ERF. Bei SCHWARZ sind erstmals Betrachtungen zum Einfluss der Temperatur auf die Viskosität der ERF bei Variation der elektrischen Steuerfeldstärke zu finden. Allerdings handelte es sich bei dem untersuchten Produkt um eine homogene ERF, welche bei einer niedrigen Schergeschwindigkeit in einem kleinem Temperaturbereich analysiert wurde. Weiterhin entwickelte und erprobte SCHWARZ eine elektrorheologische Lenkhilfe.

WUNDERLICH untersuchte den Einfluss der Elektrodenoberfläche und der Strömungsform auf den elektrorheologischen Effekt [Wun1]. Dabei wurden von ihm Hinweise erarbeitet, wie bei einer technischen Anwendung die Elektroden gestaltet werden sollten, um einen möglichst großen elektrorheologischen Effekt zu erzielen. Die zugrunde liegenden Messungen wurden alle bei 25°C durchgeführt.

4

Unter Verwendung der von WUNDERLICH experimentell gewonnenen Daten führte ECKART theoretische Untersuchungen von ERF bei homogenen und inhomogenen elektrischen Feldern durch [Eck1]. Inhalt war die Herleitung elektrorheologischer Bilanzgleichungen in Verbindung mit weiteren mathematischen Ansätzen zur Berechnung von Geschwindigkeitsprofilen für Scher- und Druckströmung sowie der Vergleich mit experimentell gewonnenen Daten. Da diese, wie bereits oben erwähnt, durchgehend bei 25°C gewonnen wurden, ist nicht nachgewiesen, ob das gewonnene Modell auch auf andere Temperaturen übertragen werden kann. Die Arbeiten von WUNDERLICH und ECKART wurden 2000 veröffentlicht.

EICH [Ech1] befasste sich in seiner Arbeit mit dem Einfluss von elektrischen Feldern auf die Viskosität nematischer Flüssigkristalle sowie isotroper Polymerlösungen. In Bezug auf die Elektrorheologie von ER-Suspensionen machte er Ausführungen zu Eigenschaften und Zusammensetzung sowie zum Polarisationsmechanismus. Insgesamt spielen ER-Suspensionen in dieser Arbeit jedoch eher eine nachgeordnete Rolle.

FEES [Fes1] schloss 2004 mit seinen Untersuchungen an WOLFF-JESSE an. Inhalt waren die Entwicklung eines hochdynamischen elektrorheologischen Servoantriebes sowie eines verbesserten Hochspannungsverstärkers und die Untersuchung der ER-Ventilkenndaten des Servoantriebes.

Parallel zur vorliegenden Arbeit befasst sich ZAUN an der RWTH Aachen mit Konstruktionskonzepten zur Entwicklung elektrorheologischer Zylinderantriebe. Da dessen Dissertationsschrift zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit noch nicht vorlag, sei an dieser Stelle auf aktuelle Veröffentlichungen hingewiesen [Zau1, Zau2, Zau3, Zau4].

Die unter den Punkten 1.2.2 bis 1.2.7 folgenden Ausführungen wurden bereits veröffentlicht [Sdr2]. Da diese jedoch einen guten Überblick über mögliche Anwendungen intelligenter Flüssigkeiten geben, sollen sie den weiteren Betrachtungen voran gestellt werden.

5

#### 1.2.2 Kennfelddämpfer für verschiedene Anwendungen

Während konventionelle Dämpfer eine konstante Dämpfung aufweisen, kann bei ER-Kennfelddämpfern die Dämpferkraft als Funktion der Kolbengeschwindigkeit in einem Kennfeld variiert werden (Bild 3). In einer ersten Bauform (Bild 4) arbeiten sie nach dem Prinzip von handelsüblichen Einrohr-Gasdruckdämpfern. Sie werden so modifiziert, dass zwischen Dämpferrohr und Dämpferkolben ein elektrisches Feld aufgebaut werden kann. Dabei ist der Dämpferkolben von der Kolbenstange elektrisch isoliert. Der Dämpfer ist mit einer ERF befüllt. Bei Kolbenbewegung wird die ERF durch den Kolben über den Spalt verdrängt. Die Verdrängung und somit die Dämpfercharakteristik wird über das im Spalt angelegte elektrische Feld geregelt. In einer zweiten Bauform erfolgt die Veränderung der Dämpfercharakteristik über ein oder zwei Bypassventile, in welchen das Fließverhalten der ERF durch Variation der elektrischen Feldstärke verändert wird [Flu1, Flu6].







Derartige Kennfelddämpfer finden ihren Einsatz in vielfältigen Anwendungen.

An erster Stelle wäre der Einsatz von Kennfelddämpfern in semiaktiven Fahrwerken für Radfahrzeuge zu nennen. Für die U.S. Army wurde ein semiaktives Fahrwerk auf der Basis von MR-Dämpfern für ein High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV), einem Geländewagen, entwickelt [TCM1, Liu1]. Die Erprobung des HMMWV zeigte eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und eine Verbesserung des Fahrverhaltens bei unebenem Gelände im Vergleich zum passiven Fahrwerk.

Ein repositionierendes, geregeltes Feder-Dämpfer-System zur Schockabsorption und Repositionierung von Schiffsaufbauten wird im Patent 102 36 514 A 1 [Pat2] beschrieben. Ein Prototyp einer derartigen Schocklagerung auf der Basis elektrorheologischer Flüssigkeiten wurde bereits entworfen und gefertigt [Flu5]. Die in das Feder-Dämpfer-System eingeleitete Schockbelastung wird über ER-Kennfelddämpfer abgebaut.

Der Rückstoß von großkalibrigen Rohrwaffen kann in Abhängigkeit von der Stärke der Treibladung mit einem ER-Kennfelddämpfer optimiert werden [Pat1]. Der Einfluss der Rohrerhöhung auf die ins Gehäuse eingeleiteten Kräfte kann dabei ohne aufwendige Mechanik kompensiert werden (Bild 5).



#### Bild 5: Hydrodynamischer Rohrwaffendämpfer mit veränderbarer Viskosität [Pat1]

Für die Dämpfung von Fahrersitzen werden bereits Serienlösungen auf der Basis magnetorheologischer Flüssigkeiten angeboten [Web2]. Das System bietet erhöhte Fahrsicherheit, eine verbesserte Ergonomie und eine Reduzierung der Schockbelastung auf den Fahrer. Im Gegensatz zur Luftfederung passt sich dieses System automatisch an das Gewicht des Fahrers an und reagiert fortlaufend auf sich ändernde Fahrzustände.

#### 1.2.3 Hochdynamischer elektrorheologischer Servoantrieb

Verschiedene Quellen [Fes1, CSD1, Flu3] beschreiben einen hochdynamischen elektrorheologischen Servoantrieb für hydraulische Anlagen. Es handelt sich dabei

um einen Hydraulikaktuator, in dessen Gehäuse in kompakter Bauweise vier ER-Ventile um einen Gleichgangzylinder herum integriert sind (Bild 6). Diese vier ER-Ventile sind zu einer Vollbrücke geschaltet (Bild 7) und zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau ohne mechanisch bewegte Teile aus. Konstruktiv werden die ER-Ventile in diesem Fall über ringförmige Kanäle realisiert, welche von der elektrorheologischen Flüssigkeit durchflossen werden. Über die Variation der elektrischen Feldstärke im Kanal wird ein Druckgefälle erzeugt. Im Gegensatz zur servohydraulischen Vierkantensteuerung können die vier ER-Ventile individuell somit der Volumenstrom individuell angesteuert und den geforderten Gegebenheiten angepasst werden.





Bild 6: Hochdynamischer Aktor RheAct [Flu3]

Bild 7: Vollbrücke aus vier ER-Ventilen [Fes2]

Der in [CSD1] vorgestellte Aktuator kann bei einem Hub von ± 35 mm eine Kraft von 400 N aufbringen. Der Betriebsdruck liegt dabei bei 40 bar, die Gesamtlänge des Aktuators beträgt 360 mm. Realisierbar sind Verfahrfrequenzen bis 1.000 Hz. In Abänderung der konstruktiven Daten sind verschiedene Baureihen mit Hüben bis 1.000 mm, Kräften bis 10.000 N und einem Betriebsdruck bis 160 bar möglich.

Der Aktuator eignet sich für Positionieraufgaben, bei denen Stellwege mit hoher Genauigkeit und kurzer Reaktionszeit realisiert werden müssen. So findet das Prinzip des Aktuators beispielsweise in dem nachfolgend beschriebenen Adaptronischen Transportsystem Anwendung.

#### 1.2.4 Adaptronisches Transportsystem

In einem BMBF-Verbundprojekt wurde ein Adaptronisches Transportsystem entwickelt, welches eine Entkoppelung der Ladung, seien es Verletzte oder andere sensible Güter, vom Basisfahrzeug ermöglicht [Sti1, Sti2, ADT1]. Es handelt sich dabei um eine Ladeplattform (Bild 8), welche zusammen mit dem erforderlichen Hydraulikaggregat und der Steuerelektronik auf jedem beliebigen Basisfahrzeug montiert werden kann. Als Hydraulikmedium wurde eine ER-Suspension in hochdynamischen elektrorheologischen Aktoren verwendet. Die Steuersoftware berücksichtigt die drei Freiheitsgrade Stampfen, Rollen und senkrechte Bewegung. Damit ist es möglich, alle auf die Ladung einwirkenden Kräfte zu eliminieren. Das betrifft sowohl Kräfte, welche von Unebenheiten der Fahrbahn herrühren, als auch Kräfte, die sich aus der Fahrdynamik ergeben (Kurvenfahrt, positive und negative Beschleunigungen).





#### 1.2.5 Schockschutz von Bauwerken

Elektrorheologische bzw. magnetorheologische Dämpfer können auch zum Schutz von Bauwerken gegen seismische Erschütterungen verwendet werden. Vor allem Forschungsinstitute in Japan und im US-Bundesstaat Kalifornien forschen auf dem Gebiet der intelligenten Flüssigkeiten, um zukünftig Gebäudestrukturen und Brücken gegen seismische Erschütterungen zu schützen [Mak1, Wah1, Sun1, Dyk1]. In diesem Zusammenhang ist es gelungen, einen 180 kN Dämpfer zu entwickeln [Lrd1], welcher etagenweise in Gebäudestrukturen zum Schutz gegen seismische Erschütterungen implementiert werden kann (Bild 9, Bild 10).



#### 1.2.6 Kupplungen und Bremsen

Mit Hilfe von elektrorheologischen Flüssigkeiten können neuartige Kupplungen als Anordnungen aus konzentrischen Ringen oder parallelen Scheiben realisiert werden. Im Falle einer Scheibenkupplung befinden sich auf der Antriebs- und Abriebswelle elektrisch voneinander isolierte Scheiben, welche die Elektroden bilden. Zur Erzeugung des Steuerfeldes wird über einen Schleifring die Hochspannung auf die Abtriebselektrode gelegt. Die Scheiben laufen in einem mit ERF gefülltem Gehäuse. Der Kraftschluss wird in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke durch die ERF erreicht. Auf diese Weise sind das übertragbare Drehmoment und das Übersetzungsverhältnis der Kupplung steuerbar. Allerdings überträgt die ERF auch ohne elektrisches Steuerfeld auf Grund ihrer Basisviskosität immer ein geringes Mindestmoment, so dass ein vollständiges Abkuppeln nur durch externe Maßnahmen möglich ist [Jen1]. In Bild 11 ist der Prototyp einer ER-Kupplung dargestellt, welcher ein übertragbares Drehmoment von 2 Nm erlaubt [Bay2]. Das Funktionsprinzip der Scheibenkupplung wird auch für Kupplungen mit magnetorheologischen Flüssigkeiten verwendet [Lmp1]. Weiterhin können derartige Bauteile auch als Bremsen betrieben werden (Bild 12). Dabei liegt der Einsatzbereich bei Drehzahlen bis 1000 min<sup>-1</sup> und einem maximalen Drehmoment von 5,6 Nm [Lrd2].





Bild 11: Elektrorheologische Kupplung [Bay2]



Einsatzmöglichkeiten bestehen als Kupplungen für Nebenaggregate, zum Ausgleich von Unwuchten an Kurbelwellen sowie als Widerstandsgeber. Problematisch gestaltet sich derzeit noch der Wärmeeintrag bei Beanspruchung im fortdauernden Betrieb.

#### 1.2.7 Elektrorheologische Lenkhilfe

In [Swz1] wird eine elektrorheologische Lenkhilfe beschrieben (Bild 13). Die Funktionsweise dieses Aktuators basiert wie bei den unter 1.2.6 beschriebenen Scheibenkupplungen auf der Übertragung von Schubspannungen in einer Torsionsströmung. Die Antriebsscheiben 1 (grün) und 2 (blau) rotieren ständig mit gleicher Drehzahl, jedoch in entgegengesetzter Drehrichtung. Zwischen diesen beiden Scheiben befindet sich eine fest mit der Welle verbundene Mitnehmerscheibe (rot). Das System läuft in einem mit ERF gefüllten Gehäuse. Liegt kein elektrisches Feld an, ist das resultierende Moment M<sub>res</sub> auf die

Mitnehmerscheibe Null. Wird nun über einen der Spalte zwischen Antriebsscheibe 1 oder 2 und der Mitnehmerscheibe ein elektrisches Feld aufgebaut, so ändert sich in diesem die Viskosität der ERF und an der Welle steht ein resultierendes Moment zur Verfügung. Die Größe des resultierenden Momentes kann durch Variation des elektrischen Feldes beeinflusst werden.



## Bild 13: Elektrorheologische Lenkhilfe, Funktionsprinzip und technische Realisierung [Swz2]

Der Aktuator kann sowohl als reiner Momentenverstärker als auch in einer elektrorheologischen, hydrodynamischen Lenkhilfe eingesetzt werden. Gegenüber einer konventionellen Servolenkung können bei dieser Lösung weitere Prozessparameter, wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit, ohne konstruktiven Mehraufwand durch Modifizierung des Regelalgorithmus integriert werden.

#### 1.3 Motivation, Ziel und Abgrenzung der Arbeit

Elektrorheologische Flüssigkeiten waren bisher immer wieder Gegenstand der Forschung. Jedoch fehlen bis heute einheitliche Methoden zur Charakterisierung von elektrorheologischen Flüssigkeiten. Mit dieser Arbeit soll ein Überblick über gebräuchliche Methoden zur Charakterisierung von elektrorheologischen Suspensionen gegeben werden, auch, um als Grundlage für eine spätere Normung zu dienen. Daher werden in dieser Arbeit ausgewählte Methoden anhand eigener Untersuchungsergebnisse vorgestellt und hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet.

Weiterhin ist der Einfluss der Temperatur auf das Verhalten elektrorheologischer Suspensionen bisher nur unzureichend untersucht worden. Lediglich SCHWARZ [Swz1] hat Betrachtungen zur Abhängigkeit des elektrorheologischen Effektes von der Temperatur am Beispiel von homogenen ERF angestellt. Daher soll innerhalb dieser Arbeit eine Darstellung der Temperaturabhängigkeit des ER-Effektes am Beispiel elektrorheologischer Suspensionen erfolgen. Zur Erklärung des Temperatureinflusses sollen auch ausgewählte Methoden der chemischen Analytik herangezogen werden.

Bekannt ist, dass elektrorheologische Suspensionen im Rotationsrheometer einer anderen Beanspruchung unterliegen als im Kapillarrheometer oder im Fließkanal (siehe 2.2, Strömungsformen). Die Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres übertragbar. Eine Ursache dafür ist, dass bisher das Fließverhalten elektrorheologischer Suspensionen ohne Einfluss eines elektrischen Steuerfeldes als newtonsches Fließverhalten betrachtet und das Fließverhalten unter Feldeinfluss im allgemeinen mit dem BINGHAM-Modell erklärt wurde. Durch eigene Untersuchungen des Fließverhaltens sowohl im Rotationsrheometer (Kapitel 3) als auch im Fließkanal (Kapitel 4) soll ein Beitrag geleistet werden, durch verschiedene Verfahren gewonnene Materialkennwerte hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit zu bewerten. Sofern bei Verwendung unterschiedlicher Verfahren von einander abweichende Materialkennwerte ermittelt werden, sollen die Ursachen dafür aufgezeigt werden. Die Untersuchungen mittels Rheometer unter Kapitel 3 dienen dabei jedoch vorrangig der Untersuchung des Temperatureinflusses auf den elektrorheologischen Effekt. Die eigenen Untersuchungen im Fließkanal schließen an frühere und aktuelle Arbeiten des Institutes für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen (IFAS) der RWTH Aachen an [Wol1, Fes1, Zau4]. Sie unterscheiden sich allerdings dadurch, dass versucht werden soll, eine geometrieunabhängige Methode zur Ermittlung der Wandschubspannung zu erarbeiten. Aufbauend auf vorhandenen Verfahren wird in dieser Arbeit schrittweise eine neue Methodik zur Ermittlung der Wandschubspannung entwickelt. Erstmalig werden dabei auch gezielt Methoden der Suspensionsrheologie angewandt. Schwerpunkt sind daher in Kapitel 4 Untersuchungen zum Fließverhalten elektrorheologischer Suspensionen in Kapillaren unterschiedlicher Geometrie bei Variation der elektrischen Feldstärke sowie dem Einfluss unterschiedlicher Betriebstemperaturen.

Das viskoelastische Verhalten von ERF ist nicht Gegenstand der Betrachtungen. Die Möglichkeiten der Charakterisierung von ERF durch Oszillationsversuche sind bekannt [Srm1, Spu1, Yas1, You1, Pan1], können jedoch in dieser Arbeit auf Grund des erforderlichen Prüfumfangs nicht berücksichtigt werden.

Weiterhin erfolgt keine umfassende chemische Charakterisierung. Die durchgeführten Untersuchungen dienen vorrangig zur Ermittlung der Zusammensetzung sowie zur Klärung des elektrorheologischen Effektes, insbesondere im Hinblick auf den Temperatureinfluss.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt eindeutig auf ER-Suspensionen, homogene ERF werden nur zu Vergleichszwecken betrachtet.

#### 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

#### 2.1 Theorien zur Beschreibung des ER-Effektes

Das rheologische Verhalten von ER-Suspensionen ohne Feldeinfluss (E = 0) entspricht angenähert dem Verhalten newtonscher Flüssigkeiten, d.h. die Schubspannung  $\tau_{F=0}$  ist linear proportional zur Scherrate D. Der Proportionalitätsfaktor  $\eta$ wird dabei als dynamische Viskosität bezeichnet (Gl. (1), Bild 14).

$$\tau_{E=0} = \eta \cdot D \tag{1}$$

Wird die ER-Suspension einer Feldstärke E > 0 ausgesetzt, ändert sich das Fließverhalten. In der idealisierten Darstellung entspricht das Fließverhalten nun dem BINGHAM-Modell. Das heißt, die ERF verhält sich zunächst wie ein elastischer Überschreiten Körper. Erst nach einer Fließgrenze  $\tau_0$ beginnt die Schubspannung  $\tau$  mit dem Schergefälle D zu steigen (Bild 14). Voraussetzung ist dabei, dass bei Aufnahme der Fließkurve  $\tau = f(D)$  sowohl die Feldstärke E als auch die Temperatur T konstant gehalten werden. In Bild 15 wird dagegen die Abhängigkeit der Schubspannung von der elektrischen Feldstärke dargestellt. Diese Zusammenhänge wurden bereits in mehreren Quellen dargelegt [Bay1, Wol1, Fes1]. Die dabei gemachten Aussagen gelten jedoch immer nur bei konstanter Temperatur. Der Einfluss der Temperaturänderung auf den elektrorheologischen Effekt blieb dabei unberücksichtigt.



Bild 14: Idealisiertes Scherverhalten von ER- Bild 15: Abhängigkeit der Schubspannung Suspensionen

von der elektrischen Feldstärke

Bei Anwendung des BINGHAM-Modells und unter Annahme eines idealisierten Scherverhaltens entsprechend Bild 14 ermittelt sich die Schubspannung  $\tau$  gemäß Gl. (2).

$$\tau = \tau_E + \tau_{E=0} = \tau_E + \eta \cdot D \tag{2}$$

In verschiedenen Quellen [Bay1, RWE1, Wol1] wird zur Beschreibung der Stärke des elektrorheologischen Effektes eine Schaltziffer bzw. ein elektrorheologischer Faktor S als Funktion der elektrischen Feldstärke E gemäß Gl. (3) angegeben.

$$S = \frac{\tau - \tau_{E=0}}{\tau_{E=0}} = \frac{\tau_E}{\tau_{E=0}}$$
(3)

Entsprechend der Darstellung in Bild 14 sinkt die Schaltziffer S kontinuierlich mit steigender Schergeschwindigkeit. Da in der Praxis die durch ein elektrisches Steuerfeld E erzeugte dynamische ER-Fließspannung  $\tau_E$  jedoch nicht mit dem gleichen Anstieg wie die Basisfließspannung  $\tau_{E=0}$  ansteigt, wird auf die Verwendung der Schaltziffer in dieser Arbeit verzichtet.

Eine vollständige Klärung der dem ER-Effekt zugrundeliegenden physikalischchemischen Zusammenhänge ist bis heute noch nicht gelungen. Der elektrorheologische Effekt von ER-Suspensionen kann jedoch anschaulich mit dem Modell der Kettenbildung erklärt werden. Wird die Flüssigkeit einem elektrischen Feld ausgesetzt, kommt es zur Polarisation der suspendierten Partikel. Diese bilden Dipole aus, ordnen sich entsprechend dem induzierten Dipolmoment innerhalb der Flüssigkeit entlang der Feldlinien an und agglomerieren zu mechanisch belastbaren Ketten (Bild 16).



Bild 16: Kettenbildung der Partikel in einer ERF durch appliziertes elektrisches Feld [Bay1]

Diese Kettenbildung wiederum hat in Abhängigkeit der Feldstärke eine signifikante Erhöhung der Viskosität zur Folge. Dieser Effekt konnte mit Hilfe von lichtmikroskopischen Untersuchungen nachgewiesen werden [Con1]. Parallel dazu verringert sich die Basisviskosität bei ansteigender Temperatur, wodurch sich die Beweglichkeit der in ihr enthaltenen Partikel erhöht. Die höhere Beweglichkeit der Partikel hat wiederum eine bessere Polarisierbarkeit zur Folge. Die Partikel ziehen sich somit bei gleicher Feldstärke, aber höheren Temperaturen stärker an, was sich ebenfalls in einer Viskositätserhöhung bemerkbar macht.

In der Praxis ist bei ER-Suspensionen eine Überlagerung dieser beiden Effekte zu beobachten (siehe 3.2.2, Seite 43ff). Generell sind die ablaufenden Prozesse jedoch sehr komplex, da sich auch Dielektrizitätszahl und Polarisationsgeschwindigkeit unter verschiedenen Bedingungen ändern können. Weitere Theorien zum elektrorheologischen Effekt wie z.B. das Modell der Ionenwolken werden u.a. von RECH [Rch1], WOLFF-JESSE [Wol1], SCHWARZ [Swz1] und WUNDERLICH [Wun1] beschrieben und sollen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Für homogene ERF konnten keine Modellvorstellungen zur Erklärung des elektrorheologischen Effektes gefunden werden.

#### 2.2 Strömungsformen

Hinsichtlich der Beanspruchung von ERF unterscheidet man drei verschiedene Strömungsformen, welche sich in der Praxis allerdings auch überlagern können. Nachfolgend soll darauf nur ansatzweise eingegangen werden, da diese an anderer Stelle bereits umfassend beschrieben wurden [Böh1, Wol1].

#### 2.2.1 Hauptbeanspruchung Scheren

Bei dieser Beanspruchung findet zwischen den gegenüberliegenden Elektrodenflächen eine Relativbewegung statt. Aus dieser Relativbewegung bei räumlich konstantem Druck resultiert ein lineares Geschwindigkeitsprofil in der Flüssigkeit (Bild 17). Ein typischer Anwendungsfall sind Kupplungen (siehe 1.2.6, Seite 10). Diese Beanspruchung herrscht auch bei der Vermessung der Viskosität mit einem Rheometer vor (3.1). Die der bewegten Elektrode entgegenwirkende Kraft ist abhängig von der elektrischen Feldstärke.



Bild 17: Hauptbeanspruchung Scheren [Bay1]

#### 2.2.2 Hauptbeanspruchung Fließen

Die Flüssigkeiten strömen bei dieser Beanspruchung durch kreis- oder rechteckförmige Querschnitte bzw. durch Ringspalte unter Wirkung einer Druckdifferenz. Es bildet sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil heraus (Bild 18). Typische Anwendungsfälle sind Hydraulikanwendungen, Stoßdämpfer und Motorlager. Dabei bildet der durchflossene Querschnitt ein Ventil, bei dem die Elektrodenflächen fest zueinander stehen. Bei konstantem Volumenstrom Q wird in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke ein Druckgefälle  $p_1 > p_2$  erzeugt.



Bild 18: Hauptbeanspruchung Fließen [Bay1]

#### 2.2.3 Hauptbeanspruchung Quetschen

Seine Anwendung findet diese Beanspruchung in Schwingungsdämpfern für sehr kleine Amplituden. Bei dieser Beanspruchung schwingen die Elektrodenflächen zueinander, die Flüssigkeit wird dabei aus dem Elektrodenspalt heraus gedrückt bzw. in den Spalt hinein gesaugt (Bild 19).



Bild 19: Hauptbeanspruchung Quetschen [Bay1]

#### 2.3 Rheologische Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von ERF

#### 2.3.1 Newtonsche Flüssigkeiten

Wie bereits unter 2.1 erwähnt entspricht das rheologische Verhalten von ER-Suspensionen ohne Feldeinfluss (E = 0) angenähert dem Verhalten newtonscher Flüssigkeiten. Gemäß DIN 1342-2 [DIN1] ist eine newtonsche Flüssigkeit eine inkompressible, isotrope, reinviskose Flüssigkeit, die folgende Bedingungen erfüllt:

- a) Schubspannung  $\tau$  und Geschwindigkeitsgefälle D sind direkt proportional.
- b) In der einfachen Scherströmung (siehe Bild 20) sind die Normalspannungen in Richtung der x-Koordinatenachse, der y-Koordinatenachse und senkrecht dazu gleich groß.
- c) Eine elastische Verformung der Flüssigkeit muss bei zeitlich veränderlicher Schubspannung so klein sein, dass sie das Geschwindigkeitsgefälle nicht beeinflusst.

In der einfachen Scherströmung (Bild 20) wird die Flüssigkeit zwischen parallelen Schichten beansprucht. Die Kinematik der Scherbeanspruchung wird durch die Schergeschwindigkeit D gemäß Gl. (4) beschrieben. Dieser Schergeschwindigkeit D wird eine Schubspannung  $\tau$  zugeordnet. Besteht zwischen Schergeschwindigkeit D und Schubspannung  $\tau$  ein linearer Zusammenhang, welcher über den Proportionalitätsfaktor  $\eta$  entsprechend Gl. (1) ausgedrückt werden kann, wird von einer newtonschen Flüssigkeit gesprochen.

Bild 20: Einfache Scherströmung [DIN1]

(4)

Erfüllt eine Flüssigkeit eine der vorgenannten Bedingungen a) bis c) nicht, handelt es sich um eine nicht-newtonsche Flüssigkeit. Zur Beschreibung des Fließverhaltens von ERF unter Einfluss eines elektrischen Feldes müssen also weitere Modelle herangezogen werden.

2.3.2 Nicht-newtonsche Flüssigkeiten

Nach DIN 1342-3 [DIN2] werden nicht-newtonsche Flüssigkeiten in folgende drei Gruppen eingeteilt:

- 1. nichtlinear-reinviskose Flüssigkeiten,
- 2. linear-viskoelastische Flüssigkeiten,
- 3. nichtlinear-viskoelastische Flüssigkeiten.

Flüssigkeiten, deren Einordnung in eine der drei vorgenannten Gruppen auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften nicht möglich ist, werden einer weiteren Gruppe von Flüssigkeiten mit zeitabhängigen rheologischen Eigenschaften zugeordnet. Insbesondere betrifft dies thixotrope und rheopexe Stoffe.

Zur Beschreibung des Fließverhaltens von ERF unter Einfluss eines elektrischen Feldes erscheinen drei Modelle als geeignet [Wun1, Wol2]:

- BINGHAM-Modell,
- CASSON-Modell,
- HERSCHEL-BULKLEY Modell.

Alle drei Modelle können das Vorhandensein einer Fließgrenze für das Fluid berücksichtigen.

Das Modell nach BINGHAM entsprechend Gl. (5) zeigt nach Überschreiten einer Fließgrenzspannung  $\tau_0$  eine Analogie zum newtonschen Fließverhalten (Kurve b in Bild 21). Mit steigender Schergeschwindigkeit stellt sich nahezu eine konstante Viskosität ein.

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot D \qquad \text{für } D > 0 \text{ und } \tau > \tau_0 \tag{5}$$
$$\tau = -\tau_0 + \eta_B \cdot D \qquad \text{für } D < 0 \text{ und } \tau < -\tau_0$$
$$D = 0 \qquad \text{für } |\tau| \le \tau_0$$

Das CASSON-Modell gemäß Gl. (6) weist im Vergleich zum BINGHAM-Modell ein strukturviskoses Verhalten auf (Kurve c in Bild 21). Im Gegensatz zum BINGHAM-Modell fällt die Viskosität hier mit steigender Schergeschwindigkeit weiter ab.

$$\left(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0}\right)^2 = \eta_c \cdot D \qquad \text{für } D > 0 \text{ und } \tau > \tau_0$$

$$- \left(\sqrt{|\tau|} - \sqrt{\tau_0}\right)^2 = \eta_c \cdot D \qquad \text{für } D < 0 \text{ und } \tau < -\tau_0$$

$$D = 0 \qquad \text{für } |\tau| \le \tau_0$$

$$(6)$$

Das Modell nach HERSCHEL-BULKLEY gemäß GI. (7) ist das allgemeinste rheologische Gesetz. Mit ihm lassen sich alle drei Kurvenverläufe aus Bild 21 darstellen:

- dilatantes Verhalten für n > 1,
- BINGHAM-Verhalten für n = 1,
- strukturviskoses Verhalten (CASSON) für n < 1.

$$\tau - \tau_0 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{D}^n \qquad \text{für } \mathbf{D} > 0 \text{ und } \tau > \tau_0 \qquad (7)$$
  
$$\tau + \tau_0 = -\mathbf{K} \cdot |\mathbf{D}|^n \qquad \text{für } \mathbf{D} < 0 \text{ und } \tau < -\tau_0$$

$$D = 0$$
 für  $|\tau| \le \tau_0$ 

Alle drei Modelle gelten für den einfachen Scherversuch und sind somit auf die ebene Schleppströmung ohne äußeres Druckgefälle ( $\Delta p = 0$ ), wie sie beispielsweise in einem Rotationsrheometer auftritt, anwendbar.



Bild 21: Fließ- und Viskositätskurven für plastische Stoffe

#### 2.3.3 Weitere Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens

Von größerer Bedeutung in der Praxis ist jedoch das Fließverhalten von ERF beim Durchfluss von elektrorheologischen Strömungswiderständen. Dabei durchfließt die ERF vorzugsweise eine Ring- oder Rechteckspaltgeometrie. Durch Variation der anliegenden Steuerfeldstärke kann die über der Spaltgeometrie entstehende Druckdifferenz verändert werden. Dabei treten applikationsbedingt sehr hohe Schergeschwindigkeiten auf. Diese Beanspruchung unterscheidet sich deutlich von der in einem Rotationsrheometer.

WOLFF-JESSE und FEES [Wol2] haben daher die unter 2.3.2 aufgeführten Modelle mit eigenen, experimentell ermittelten Messwerten aus Untersuchungen an ER-Strömungswiderständen verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die bekannten Modelle das Fließverhalten von ERF in Strömungswiderständen nur unzureichend darstellen können. Daraufhin wurde von WOLFF-JESSE und FEES auf der Basis eines vereinfachten **BINGHAM-Modells** ein eigenes phänomenologisches Modell erstellt. Das gefundene Modell gemäß Gl. (8) wurde als vereinfachtes BINGHAM-Modell bezeichnet und zeigte eine gute Näherung zu den experimentell ermittelten, dynamisch aufgenommenen Fließkurven. Wie in Gl. (8) zu erkennen ist, werden in diesem Modell bei der Berechnung der dynamischen Fließspannung  $\tau_E$ die elektrische Feldstärke E. die Fließgeschwindigkeit v, die Spalthöhe h und die Spaltlänge L mit unterschiedlicher In diesem Fall bezeichnet Wertigkeit berücksichtigt. τF nicht die Fließgrenzspannung, sondern die nach Überwindung der Fließgrenzspannung gemessene Schubspannung, welche auf Grund des elektrorheologischen Effektes bei der dynamischen Aufnahme von Fließkurven gemessen wird (Bild 14). Die 36 Parameter a<sub>1</sub>...o<sub>3</sub> sind dabei jeweils für jede ERF und jede Temperatur experimentell zu ermitteln.
$$\begin{aligned} \tau_{E} &= a_{1} \cdot E + a_{2} \cdot E^{2} + a_{3} \cdot E^{3} + \left(b_{1} \cdot E + b_{2} \cdot E^{2} + b_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v \\ &+ \left(c_{1} \cdot E + c_{2} \cdot E^{2} + c_{3} \cdot E^{3} + \left(d_{1} \cdot E + d_{2} \cdot E^{2} + d_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v\right) \cdot h \\ &+ \left(e_{1} \cdot E + e_{2} \cdot E^{2} + e_{3} \cdot E^{3} + \left(f_{1} \cdot E + f_{2} \cdot E^{2} + f_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v\right) \cdot h^{2} \\ &+ \left(g_{1} \cdot E + g_{2} \cdot E^{2} + g_{3} \cdot E^{3} + \left(k_{1} \cdot E + k_{2} \cdot E^{2} + k_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v\right) \cdot L \\ &+ \left(\left(l_{1} \cdot E + l_{2} \cdot E^{2} + l_{3} \cdot E^{3} + \left(m_{1} \cdot E + m_{2} \cdot E^{2} + m_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v\right) \cdot h\right) \cdot L \\ &+ \left(\left(n_{1} \cdot E + n_{2} \cdot E^{2} + n_{3} \cdot E^{3} + \left(o_{1} \cdot E + o_{2} \cdot E^{2} + o_{3} \cdot E^{3}\right) \cdot v\right) \cdot h^{2}\right) \cdot L \end{aligned}$$

Die Fließgeschwindigkeit v berechnet sich dabei geometrieabhängig aus dem Volumenstrom Q, welcher über den ER-Strömungswiderstand fließt (Gl. (9)). Somit wird über die Fließgeschwindigkeit auch die Spaltbreite B erfasst.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B \cdot h}$$
(9)

Aus dem Volumenstrom Q kann ebenso die scheinbare Wandschergeschwindigkeit  $D_S$  berechnet werden (Gl. (10)).

$$D_{\rm s} = \frac{6 \cdot Q}{B \cdot h^2} \tag{10}$$

Nach WOLFF-JESSE und FEES ergibt sich somit aus GI. (8) für die dynamische ER-Fließspannung  $\tau_E$  eine Abhängigkeit gemäß GI. (11).

$$\tau_E = f(E, h, v, L) \tag{11}$$

Das Modell ist entsprechend der Messbedingungen gültig, innerhalb derer die 36 Koeffizienten ermittelt wurden. Das Modell wurde in die Simulationssoftware DSHplus der Firma FLUIDON implementiert und auf seine Gültigkeit in umfangreichen Versuchsreihen überprüft [Zau1]. Die Grenzen für dieses Modell werden von ZAUN entsprechend Tabelle 1 spezifiziert [Zau2].

Feldstärke	E = 0 - 6	kV/mm
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v = 0 – 5,3	m/s
ER-Spalthöhe	h = 0,5 – 1,3	mm
Mittlerer Spaltdurchmesser	d = 20 - 40	mm
ER-Spaltlänge	L = 100 - 300	mm

Tabelle 1: Grenzen für das vereinfachte BINGHAM-Modell nach WOLFF-JESSE und FEES

KEMMETMÜLLER und KUGI [Kem1, Kem2] stützen sich bei der Erstellung ihres Modells auf die Betrachtungen von RAJAGOPAL [Raj1] und ECKART [Eck1]. Ausgehend von der Annahme, dass die ERF als ein homogenes Kontinuum dargestellt werden kann, wurde für die Schubspannung  $\tau$  der in GI. (12) dargestellte BINGHAM-ähnliche Ansatz gefunden.

$$\tau = \tau_0(E) \operatorname{sign}(D) + \eta \cdot D \qquad \text{für } D \neq 0$$
(12)

Für den Fall  $|\tau| < \tau_0(E)$  gilt D = 0, das Material verhält sich dann wie ein isotroper elastischer Festkörper. Die Fließgrenzspannung  $\tau_0(E)$  sowie die Parameter  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  werden durch Approximation experimentell bestimmt (Gl. (13)).

$$\tau_0(E) = \alpha_2 \bullet E^2 + \alpha_3 \bullet E^3 \tag{13}$$

Nach KEMMETMÜLLER und KUGI ergibt sich somit aus den beiden vorgenannten Gleichungen für die Schubspannung  $\tau$  eine Abhängigkeit gemäß Gl. (14).

$$\tau = f(E, D) \tag{14}$$

Bei Vergleich von Gl. (11) mit Gl. (14) fällt auf, dass die Fließgrenzspannung  $\tau_E$  in Gl. (11) neben der Feldstärke E auch von geometrischen Parametern abhängig ist. In keiner der beiden Gleichungen wird jedoch die Abhängigkeit der Fließgrenzspannung von der Temperatur direkt berücksichtigt.

Andere Modelle werden in weiteren Quellen beschrieben [Kam1, Brn1].

#### 2.4 Charakteristische Eigenschaften von ERF

# 2.4.1 Kennwerte zur Charakterisierung einer ERF

Zur eindeutigen Charakterisierung von ERF werden Materialkennwerte, aber auch anwendungsspezifische Eigenschaften von ERF benötigt. Diese sollen nach Möglichkeit unabhängig von der Art des Messgerätes oder der Messgeometrie vergleichbar und reproduzierbar ermittelt werden können. Weiterhin sollten anwendungsnahe Eigenschaften nach Möglichkeit in reine Materialeigenschaften überführt werden. Die Definition von Kennwerten dient letztlich als Schnittstelle zwischen Fluidentwicklern, regelungstechnischen Anwendern, Fluidherstellern und Endverbrauchern sowie zur Sicherstellung der Produktgualität und Optimierung des Herstellungsverfahrens.

# Eigenschaften, zu deren Ermittlung bereits Normen als Grundlage vorliegen

Unter diesem Punkt werden alle Eigenschaften aufgeführt, zu deren Ermittlung bereits Normen als mögliche Grundlage vorliegen. Ob diese Normen letztlich geeignet sind, muss im Einzelfall noch geprüft werden. Möglicherweise sind Änderungen einzelner bereits genormter Prüfverfahren erforderlich.

- dynamische Viskosität bei elektrische Leitfähigkeit \_ E=0 kV/mm Steifigkeit / Kompressibilität \_
- Partikelgröße und \_ \_ Partikelgrößenverteilung
- Durchschlagsfestigkeit und \_ Dielektrizitätszahl
- Dichte und Feststoffgehalt \_
- Wasseraufnahme / Wassergehalt
- Toxikologie \_
- Temperaturbereich

- Flüchtigkeit
- Stockpunkt
- Flammpunkt \_
- Zündpunkt \_
- Volumenausdehnungskoeffizient -
- Gaslöseverhalten \_
- Siedepunkt / Siedebereich \_
- Oberflächenspannung \_
- Farbe

Eigenschaften, für deren Ermittlung noch keine Prüfverfahren definiert sind Unter diesem Punkt werden alle Eigenschaften aufgeführt, für deren Ermittlung noch keine Prüfverfahren definiert sind.

-	Schubspannung / dynamische	-	Verschleißverhalten ERF und
	Viskosität τ, η = f(E)		Alterungsstabilität
-	Sedimentation	-	Lagerstabilität ERF
-	Redispergierbarkeit	-	Linearität / Hysterese
-	Ansprechzeit Effekt	-	Abrasivität der Partikel
-	Reproduzierbarkeit von ERF-	-	Elektrophorese
	Eigenschaften	-	Atmosphäreneinfluss
-	Stromdichte $J = f(T)$	-	Druckabhängigkeit von ERF-
-	Temperatureinfluss		Eigenschaften
-	Abhängigkeit von Volumenstrom	-	sensorische Eigenschaften
	bzw. Schergeschwindigkeit		

#### Sonstige Eigenschaften

Unter diesem Punkt werden sonstige Eigenschaften aufgeführt. Dabei handelt es sich um Kennwerte, welche als Information anzugeben oder über die zunächst weitere Informationen einzuholen sind. Weiterhin sind unter diesem Punkt Kennwerte aufgeführt, zu denen das Vorhandensein von Prüfnormen noch nicht recherchiert ist.

-	Materialverträglichkeit	-	Material-Basisflüssigkeit
---	-------------------------	---	---------------------------

- Recyclingfähigkeit Material-Partikel
- Reinigung von Lackierflächen Geruch

# 2.4.2 Anforderungen an eine ERF

Für den praktischen Einsatz sind an elektrorheologische Flüssigkeiten verschiedene Anforderungen zu stellen [Sdr1]:

- geringe Basisviskosität oberhalb der erforderlichen Mindestviskosität,

- hoher elektrorheologischer Effekt bei guter Reproduzierbarkeit,
- Sedimentationsstabilität der Suspension,
- gute Redispergierbarkeit,
- kein oder nur geringer Verschleiß durch dispergierte Festkörperpartikel,
- großer Temperatureinsatzbereich,
- Materialverträglichkeit mit Werkstoffen,
- geringe elektrische Leitfähigkeit,
- Langzeitstabilität und Alterungsbeständigkeit,
- Umweltverträglichkeit.

Handelsübliche elektrorheologische Flüssigkeiten erfüllen heute diese Anforderungen in weiten Bereichen. Ein genereller Verbesserungsbedarf besteht lediglich hinsichtlich der Höhe des elektrorheologischen Effektes und damit der übertragbaren Schubspannung. Diesbezüglich stehen die untersuchten elektrorheologische Flüssigkeiten noch hinter magnetorheologischen Flüssigkeiten zurück. Die Sedimentationsstabilität der Suspensionen bereitet derzeit noch Probleme, ist jedoch durch einfache technische Maßnahmen beherrschbar. Auch diesbezüglich ist eine Verbesserung bei zukünftigen Suspensionen zu erwarten. Aussagen über Langzeitstabilität und Alterungsbeständigkeit liegen derzeit noch nicht in ausreichendem Maß vor.

# 2.5 Untersuchte Produkte und deren Kenndaten

Die für die Untersuchungen verwendeten Flüssigkeiten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Generell wird hinsichtlich der Zusammensetzung zwischen ER-Suspensionen und homogenen ERF unterschieden.

Bei den homogenen ERF stand nur ein sehr geringes Probenvolumen zur Verfügung. Es handelt sich dabei um Restbestände aus abgeschlossenen Forschungsprojekten. Außerdem hat der Hersteller die Entwicklung und Produktbetreuung eingestellt. Ein wesentlicher Vorteil homogener ERF gegenüber ER-Suspensionen ist, dass bei ihnen keine Probleme mit Elektrophorese und Agglomeration auftreten können, weil sie keine suspendierten Teilchen enthalten. Der mit homogenen ERF erreichbare ER-Effekt ist zur Zeit jedoch noch kleiner als

bei ER-Suspensionen, außerdem reagieren sie langsamer auf Änderungen des Steuerfeldes [Jen1].

#### Tabelle 2: Produktübersicht

Produkt	Hersteller	Kurzbeschreibung
EPS 3301	RWE-DEA	Homogene ERF, unverdünnt
EPS 3301/ISO 32	RWE-DEA	Homogene ERF (38 Gew%) mit 62% Weißöl
RHEOBAY V.P. AI 3565	BAYER	ER-Suspension: Polyurethanpartikel mit Lithiumchlorid in Silikonöl
RHEOBAY V.P. AI 3566	BAYER	ER-Suspension: Polyurethanpartikel mit Zinkchlorid in Silikonöl
NMW ERF44	NMW	ER-Suspension: Polyurethanpartikel mit Lithiumchlorid in Silikonöl

ER-Suspensionen wurden in der Vergangenheit bereits umfangreichen Untersuchungen unterzogen. Diese Umstände und das größere verfügbare Probenvolumen haben dazu geführt, dass ein Großteil der Untersuchungen zunächst nur an den vorhandenen ER-Suspensionen durchgeführt wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dann mit einem verringerten Versuchsaufwand auf die homogenen ERF angewandt.

Auf die Zusammensetzung der Produkte wird unter 5.4 eingegangen.

# ER-Suspensionen

Den Produktdatenblättern des Rheobay-Herstellers wurden nachfolgende, in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgeführte Kennwerte entnommen [Bay1]. Bei dem Produkt ERF44 der NMW Neue Materialien Würzburg GmbH handelt es sich um ein Versuchsprodukt, zu welchem bis dato keine Produktdatenblätter veröffentlicht worden sind.

Temperatur 9 [°C]	0	10	20	40	60
Basisviskosität η [mPa s]	98	80	73	55	27
Schwellfeldstärke E <sub>0</sub> [V/mm]	1651	1597	1382	999	804
Schubspannung $\tau$ bei E = 3 kV/mm [Pa]	588	991	1587	2213	1952

#### Tabelle 3: Kennwerte des Herstellers für Rheobay Al 3565 [Bay1]

Tabelle 4: Kennwerte des Herstellers für Rheobay Al 3566 [Bay1]

Temperatur 9 [°C]	25	60	90	120
Basisviskosität η [mPa s]	50	27	23	17
Schwellfeldstärke E <sub>0</sub> [V/mm]	1264	1508	1018	1099
Schubspannung $\tau$ bei E = 3 kV/mm [Pa]	602	1398	1782	1553

Die Viskositätswerte der beiden Rheobay-Produkte sind im Viskositäts-Temperatur-Diagramm in Bild 22 grafisch dargestellt. In dieser sowie allen weiteren Darstellungen dieser Art ist die Achse für die dynamische Viskosität einfach logarithmisch, die Temperaturachse linear skaliert. Diese Darstellungsform weicht vom Viskositäts-Temperatur-Blatt nach UBBELOHDE [Ubl1] insofern ab, dass nach UBBELOHDE die Temperatur einfach logarithmisch skaliert dargestellt wird. Weiterhin wird nach UBBELOHDE statt der dynamischen die kinematische Viskosität auf einer doppelt logarithmisch skalierten Achse dargestellt.



Bild 22: Basisviskositäten Rheobay Al 3565 und 3566 gem. Herstellerangaben [Bay1]

Als Temperatureinsatzbereich wurde von den Herstellern für das Produkt Rheobay Al 3565 der Bereich von 0°C bis 60°C und für Rheobay Al 3566 der Bereich von 25°C bis 120°C vorgegeben. Generell ist bekannt, dass der Temperatureinsatzbereich von ER-Suspensionen bei 60 K bis maximal 80 K liegt. Der vorgegebene Temperatureinsatzbereich von Rheobay AI 3566 liegt mit 95 K somit deutlich über diesem empfohlenen Bereich.

# Homogene ERF

Für das Produkt EPS 3301 und seine Mischungen wurden dem Produktdatenblatt des Herstellers [RWE1] nachfolgend aufgeführte Kennwerte entnommen (Tabelle 5). Die ERF kann demnach in verschiedenen Mischungsverhältnissen entsprechend ISO-Klassifikation eingesetzt werden. Das ungemischte Produkt zeigt im Vergleich zu den Mischungen nur einen geringen elektrorheologischen Faktor. Dabei handelt es sich um den Quotienten aus maximaler dynamischer Viskosität bei 8 kV/mm und Basisviskosität. In der ISO-Klasse 68 zeigt dann das Produkt ein Optimum über dem Temperaturbereich von 40°C bis 80°C.

ISO Klasse	Original	ISO 150	ISO 100	ISO 68	ISO 46	ISO 32
Verdünnung [%]		32	42	50	57	62
Dyn. Viskosität, 40°C, 0 kV/mm [mPa s]	600	120	80	67	48	37
Dyn. Viskosität, 40°C, 8 kV/mm [mPa s]	2850	1225	950	850	625	475
Dyn. Viskosität, 60°C, 0 kV/mm [mPa s]	300	70	50	40	32	26
Dyn. Viskosität, 60°C, 8 kV/mm [mPa s]	1950	900	675	575	450	325
Dyn. Viskosität, 80°C, 0 kV/mm [mPa s]	170	47	35	29	24	20
Dyn. Viskosität, 80°C, 8 kV/mm [mPa s]	1565	750	620	490	375	290

Tabelle 5: Elektrorheologische Kennwerte der homogenen ERF EPS 3301 [RWE1]

Gemäß den Herstellerangaben zeigt das Produkt EPS 3301/ISO 68 das in Bild 23 dargestellte Viskositäts-Temperatur-Verhalten und die in Bild 24 dargestellte Abhängigkeit der Schubspannung von der elektrischen Feldstärke. Die Flüssigkeit wurde dabei jeweils nur mit einer verhältnismäßig geringen Schergeschwindigkeit von 200 s<sup>-1</sup> vermessen. In Bild 23 wird nur das Viskositäts-Temperaturverhalten bei 0 kV/mm und 8 kV/mm dargestellt. Zwischenwerte fehlen. Zu Bild 24 fehlt die Angabe der Temperatur. Aus den Werten der Tabelle 5 ist jedoch zu schlussfolgern, dass den Messwerten in Bild 24 eine Temperatur von ca. 100°C zu Grunde liegt.







# 3 RHEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG MITTELS ROTATIONSRHEOMETER

### 3.1 Elektrorheologiemessplatz

#### 3.1.1 Vorbemerkungen

Derzeit existieren noch keine standardisierten Prüfverfahren zur Charakterisierung von ERF bei elektrischen Feldstärken E > 0. Da ERF verschiedenen Strömungsformen ausgesetzt sein können, sind folgende applikationsnahe Untersuchungsmethoden möglich.

- a) Untersuchungen im Dämpferprüfstand: Je nach Aufbau des Dämpfers wird die ERF durch Fließen bzw. Quetschen beansprucht. Möglich ist aber auch die Überlagerung beider Strömungsformen. Vorrangig kann das Dämpfungs- und Langzeitverhalten von ERF charakterisiert werden.
- b) Untersuchungen im Hydraulikpr
  üfstand: Hier kann das Fließen der ERF in verschiedenen Spaltgeometrien untersucht werden. Derartige Untersuchungen sind Gegenstand der Betrachtungen unter Kapitel 4.
- c) Untersuchungen mit einem koaxialen Rotationsrheometer: Die ERF wird dabei zwischen koaxialen Zylindern hauptsächlich durch Scheren oder zwischen zwei parallelen Platten durch Torsion beansprucht. Diese Beanspruchungsart kann auf den Einsatz von ERF in Kupplungen übertragen werden.

3.1.2 Koaxiales Rotationsrheometer mit ER-Option und Temperiermöglichkeit

Als Rheometer wurde ein HAAKE RS80 mit Elektrorheologie-Option verwendet. Zum Temperieren der ERF im Temperiergefäß wurde dieses an einen Umwälzthermostaten HAAKE K50/DC50 angeschlossen. Aus vorangegangenen Untersuchungen anderer Einrichtungen ist bekannt, dass mit einer derartigen Versuchsausstattung relativ gut reproduzierbare Werte ermittelt werden können. Um das Berühren unter Spannung stehender Teile des Rheometers zu verhindern, ist dieses in einer nichtleitenden Einhausung untergebracht. Der vordere Teil der Einhausung kann zur Bedienung des Rheometers abgenommen werden. Zwischen beiden Teilen sind zwei Endschalter montiert. Der Betrieb der Hochspannungsversorgung ist nur möglich, wenn die Einhausung durch vier Spannverschlüsse geschlossen ist.

#### 3.1.3 Hochspannungsversorgung

Zum Betrieb der ER-Option ist eine Hochspannungsversorgung erforderlich, welche im allgemeinen von den Rheometerherstellern nicht zu den Geräten angeboten wird. Dabei wird zwischen Verstärkern für den Ein-, Zwei- und Vier-Quadrantenbetrieb unterschieden. Im Ein-Quadrantenbetrieb arbeiten Verstärker nur als Stromquelle, d.h. sie liefern bei positiver Spannung einen positiven Strom (Bild 25-a). Es kann also nur eine gesteuerte Aufladung erfolgen, die Entladung erfolgt über den Verlustleitwert der ERF. Erst im Zwei-Quadrantenbetrieb kann ein schneller und kontrollierter Abbau der gespeicherten elektrischen Feldenergie erfolgen, indem der Verstärker bei gleicher Polarität der Ausgangsspannung sowohl als Stromguelle als auch als Stromsenke betrieben wird (Bild 25-b). Die Hochspannungsquelle wurde in den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen jedoch im Vier-Quadrantenbetrieb betrieben. Im Vier-Quadrantenbetrieb wird die ERF in Abhängigkeit vom Steuersignal positiv und negativ aufge- und entladen (Bild 25 c). Der Energiesteller arbeitet also als Stromguelle und als Stromsenke, wobei er positive und negative Spannungen sowie positive und negative Ströme liefert und dadurch mittelwertfreie Signale erzeugen kann [Rch1]. Durch die Änderung der Polarität der angelegten Spannung in Abhängigkeit vom Steuersignal wird der Effekt der Elektrophorese vermieden.



Bild 25: Spannung-Strom-Diagramm für ohmsch-kapazitive Lasten. a: Ein-Quadrantbetrieb, b: Zwei-Quadrantenbetrieb, c: Vier-Quadrantenbetrieb [Rch1]

Als geeignetes Gerät wurde die Hochspannungsquelle SVU 6000/16 von der Dienstleistungsgesellschaft für Automatisierungs- und Signalverarbeitungssysteme D\*ASS Saarbrücken ausgewählt [SVU1]. Zur Gewährleistung des Vier-Quadrantenbetriebes wurden zwei Zwei-Quadranten-Hochspannungsquellen mit einer Zusatzelektronik als Vollbrücke geschaltet (Bild 26). Die Beschreibung dieses Vollbrückenverstärkers ist bei RECH [Rch1] zu finden. Eine Angabe der Leistungsparameter der in dieser Arbeit verwendeten Hochspannungsquellen erfolgt in Tabelle 9 im Abschnitt 4.1.3.



#### Bild 26: Blockschaltbild für den Vier-Quadrantenbetrieb [SVU1]

Zum Betrieb der Hochspannungsquelle werden weiterhin ein Funktionsgenerator KONTRON PG 8020-1 zur Ansteuerung sowie ein Labornetzgerät KNÜRR-HEINZINGER Polaris 35-20 als externe Gleichspannungsquelle benötigt. Die Einzelkomponenten sind in Bild 28, ihre Verschaltung ist schematisch in Bild 27 dargestellt. Die Hochspannungsversorgung lässt jedoch auch generell eine Ansteuerung im Zwei-Quadrantenbetrieb zu.





#### 3.1.4 Messgeometrie

Zur Vermessung von Flüssigkeiten wird als Sensor üblicherweise das System Rotor – Becher verwendet. Bei Betrieb der Hochspannungsversorgung im Einbzw. Zwei-Quadrantenbetrieb hätten verschiedene Geometrien zur Verfügung gestanden. Im Fall des verwendeten HAAKE RS80 würde dabei die Spannungszuführung über den Schleifringkontakt am Rotor erfolgen. Es ist jedoch unumgänglich, dass spannungsführende Teile elektrisch gegen das Rheometer isoliert werden sowie das Rheometer selbst geerdet wird.

Der Einfluss der Messgeometrie ist von RECH [Rch1] bereits umfassend untersucht worden. Da jedoch die Hochspannungsquelle im Vier-Quadrantenbetrieb betrieben werden sollte, war es erforderlich, eine Spannungszuführung sowohl zum Rotor als auch zum Becher zu realisieren. Daraufhin muss nun auch der Becher elektrisch gegen das Rheometer isoliert werden. Der dafür zur Verfügung stehende Bauraum schränkte die Auswahl an Geometrien stark ein. Es wurde daher im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ausschließlich mit folgendem System gearbeitet (Bild 29):

- Rotor mit ebenem Zylinderboden,  $D_a = 19,7$  mm, L = 55 mm,
- Becher mit nicht leitendem Becherboden,  $D_i = 21,7$  mm, L = 63,5 mm.

Der Spaltabstand zwischen Becherboden und Rotor betrug 2 mm. Der Becher wurde bei jeder Messung bis ca. 2 mm unter dem oberen Rand befüllt. Aus den angegebenen Maßen ergibt sich eine Flüssigkeitssäule von ca. 4 mm oberhalb des Rotors im Becher.





Bild 28: Hochspannungsversorgung [Sdr3]

Bild 29: RS80, Rotor und Becher bei auseinander gefahrenem Lift [Sdr3]

## 3.2 Temperaturverhalten von elektrorheologischen Flüssigkeiten

#### 3.2.1 Bestimmung der Basisviskosität der ER-Suspensionen

Die Basisviskosität der verschiedenen Produkte wurde im Rahmen der Untersuchungen zum Verhalten der ERF unter Hochspannungseinfluss fortlaufend bestimmt. Bei einer Vielzahl von Messreihen wurde jeweils bei konstanter Temperatur nach Erhöhung der elektrischen Feldstärke von 0 auf 6 kV/mm die Basisviskosität zur Kontrolle gemessen. Danach wurde die elektrische Feldstärke von 6 auf 0 kV/mm wieder reduziert. Somit konnte bei jeder Feldstärke > 0 kV/mm eine Doppelbestimmung und für die Basisviskosität eine Dreifachbestimmung durchgeführt werden. Die ermittelten Basisviskositäten sind in Bild 30 dargestellt.

Zum Anfang der Untersuchungen wurde mit verschiedenen Messabläufen zur Bestimmung der Viskosität experimentiert. Auch wenn sich einige Messabläufe als ungeeignet für die Bestimmung der Viskosität unter Einfluss eines elektrischen Feldes erwiesen, konnten die ermittelten Werte für die Basisviskosität verwendet werden, was die Vielzahl der Einzelmesswerte in Bild 30 erklärt.



Bild 30: Basisviskositäten von ERF ermittelt mit Rheometer RS80

# 3.2.2 Verhalten von ER-Suspensionen bei Einfluss eines elektrischen Feldes

# Mögliche Messfehler

Messfehler bei der Vermessung elektrorheologischer Flüssigkeiten mit einem Rheometer und Möglichkeiten zu deren Vermeidung wurden in [Rch1] umfassend beschrieben. Als die wichtigsten wurden benannt:

- die durch die Spannungszuführung zum Rotor verursachte Reibung,
- der elektrische Übergangswiderstand zwischen Spannungszuführung und Rotor,
- eine exzentrische Zylinderanordnung,
- Störungen der Messwertaufnehmer sowie der elektronischen Schaltungen zur Messwerterfassung, Messauswertung und Steuerung des Rheometers durch die ERF-Steuerspannung,
- Energiedissipation,
- die mechanische Resonanzfrequenz des Rheometers,
- Elektrophorese und Dielektrophorese,
- Randeinflüsse durch die obere und untere Berandung des Innenzylinders sowie Einflüsse der Zylinderendfläche.

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde eine Reihe von Maßnahmen ergriffen, um Messfehler möglichst auszuschließen bzw. gering zu halten.

Zur Vermeidung von Elektrophorese wurde die unter 3.1.3 beschriebene Hochspannungsversorgung konzipiert und im Vier-Quadrantenbetrieb verwendet. Zur Ansteuerung der ERF in den nachfolgend beschriebenen Messungen diente somit ein Wechselfeld mit einem mittelwertfreien und sinusförmigen Zeitverlauf der Feldstärke. Der Zusammenhang zwischen maximaler und effektiver elektrischer Feldstärke ergibt sich dabei gemäß GI. (15). Mit einer Frequenz von f = 100 Hz liegt die Steuerspannungsfrequenz auch deutlich über dem in [Rch1] empfohlenen Wert, um eine Anregung des Rheometers im Bereich von dessen mechanischer Resonanzfrequenz zu vermeiden.

$$E_{eff} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$
(15)

Elektrische Felder von Zylinder-Messanordnungen sind an den Kanten zwischen Zylindermantel und Zylinderboden bzw. Zylinderdeckel inhomogen. In inhomogenen Feldern wandern die polarisierten Partikel von ER-Suspensionen in Richtung des Feldgradienten. Dieser Effekt wird als Dielektrophorese bezeichnet und führt bei Zylinder-Messanordnungen zu einer Zunahme der Teilchendichte im Messspalt und dadurch zu einem Ansteigen der Drehmomentwerte mit zunehmender Messdauer [Rch1].

Wie unter 3.1 beschrieben war die Auswahl an Messgeometrien konstruktiv beschränkt. Einflüsse der Zylinderendfläche wurden jedoch durch die Verwendung eines Außenzylinders mit elektrisch nicht leitendem Becherboden ausgeschlossen. Randeinflüsse durch die obere und untere Berandung des Innenzylinders blieben jedoch unberücksichtigt, da ein dazu erforderlicher zweiter Innenzylinder anderer Länge nicht zur Verfügung stand, um das in [Rch1] beschriebene Differenzenverfahren anzuwenden.

Um die Wirkung der während der Messung auftretenden Dielektrophorese und Energiedissipation zu eliminieren, fanden fast alle Messungen bei diskreten Scherraten von 650 s<sup>-1</sup> statt. Die Gesamtmessdauer betrug bei jeder Feldstärke 45 Sekunden, wobei davon nur die ersten 20 Sekunden nach Zuschaltung des Steuerfeldes zur Auswertung heran gezogen wurden. Innerhalb dieser kurzen Messdauer konnte kein Anstieg des Drehmomentes festgestellt werden.

Nach Beachtung der vorangegangen Maßnahmen verbleibt als größte erfassbare Fehlerquelle die durch die Spannungszuführung zum Rotor verursachte Reibung. Die Spannungszuführung erfolgt über einen Schleifkontakt auf den Außenring eines auf den Rotorschaft aufgezogenen Wälzlagers. Das Wälzlager wurde jeweils vor Versuchsbeginn gereinigt und neu geölt. Mit Versuchsbeginn wurde zunächst der Reibungswiderstand gemessen, indem der Rotor leer in der Luft lief. Zu Versuchsende wurde diese Messung wiederholt. Es erfolgte jeweils eine Doppelbestimmung. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Reibungswiderstand  $\eta_R$ bzw.  $\tau_R$  wurde dann von den jeweiligen Messwerten subtrahiert, um so die tatsächlichen Werte für Viskosität und Schubspannung zu erhalten. Festzustellen ist in diesem Zusammenhang, dass der Reibungswiderstand durch die Spannungszuführung mit steigender Probentemperatur sinkt, da sich die Temperierung der Probe auch auf den Rotor und somit auch auf die Reibung im Wälzlager auswirkt. Typische Reibungswiderstände sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Probentemperatur	η <sub>R</sub> bei D = 650 s <sup>-1</sup>	$\tau_{\rm R}$ bei D = 650 s <sup>-1</sup>
25°C	8,2 mPa s	5,3 Pa
60°C	6,2 mPa s	4,0 Pa
120°C	4,3 mPa s	2,8 Pa
Mittelwert über alle Messungen	7,6 mPa s	4,9 Pa

Tabelle 6: Typische Reibungswiderstände durch Spannungszuführung zum Rotor

#### Schubspannung und Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit

Bei konventionellen Ölen wird zur rheologischen Charakterisierung das Verhalten von Schubspannung und Viskosität bei ansteigenden Schergeschwindigkeiten untersucht und in Form von Fließkurven dargestellt. Newtonsche Substanzen weisen dabei gem. Gl. (1) einen linearen Anstieg der Schubspannung sowie eine konstante Viskosität auf. Auch ER-Suspensionen zeigen dieses Verhalten, solange kein Feld anliegt. Wird die ERF jedoch einem elektrischen Feld ausgesetzt, zeigt diese hinsichtlich der Schubspannung das Verhalten eines BINGHAM-Körpers. Das bedeutet, dass zunächst eine gewisse Schubspannung aufzubringen ist, um die ERF zum Fließen zu bringen. Das daraus resultierende Verhalten der Schubspannung ist in Bild 31 und das der Viskosität in Bild 32 dargestellt. Bild 31 deckt sich mit der schematischen Darstellung in Bild 14. In beiden Bildern ist deutlich zu erkennen, dass Schubspannung und Viskosität elektrorheologischer Suspensionen von der Schergeschwindigkeit abhängige Größen sind.

Zur Ermittlung von Fließkurven bieten Rheometer verschiedene Messmodi an. Bei Vorgabe einer Schubspannung (Controlled Stress - CS) wird die sich einstellende Schergeschwindigkeit gemessen. Wird dagegen eine Schergeschwindigkeit (Controlled Rate - CR) vorgegeben, ist die sich einstellende Schubspannung die Messgröße. Im CR-Modus besteht weiterhin die Möglichkeit, die Schergeschwindigkeit stetig in Form einer Rampe oder in Einzelschritten als CR-Treppe zu verändern.

Zur Ermittlung der Abhängigkeit der Schubspannung und der Viskosität von der Schergeschwindigkeit bei unterschiedlichen Feldstärken wurde als Messmodus eine CR-Treppe gewählt (Bild 31, Bild 32). Die Schergeschwindigkeit wurde in Stufen erhöht und je Stufe für ca. 6 s gehalten. Das Durchfahren der neun Messpunkte zwischen 50 und 650 s<sup>-1</sup> erforderte eine Gesamtmessdauer von ca. 60 s. Das elektrische Steuerfeld wurde vor der Messung zugeschaltet.

Die Aufnahme derartiger Fließkurven zur Charakterisierung von ERF hat sich als ungeeignet erwiesen. Vor allem die Messdauer zum Durchfahren des Schergeschwindigkeitsbereiches hat sich als zu lang herausgestellt. Besonders bei hohen Feldstärken kam es bei den Messungen zu einem Anstieg der Schubspannung über die Messdauer. Zum Vergleich wurden daher Einzelmessungen durchgeführt, bei denen die Probe nur über einen kurzen Zeitraum (20 s) einer konstanten Schergeschwindigkeit ausgesetzt wurde. Zur Auswertung wurde der kleinste Wert nach Zuschaltung des Steuerfeldes heran gezogen. Ab Feldstärken von 4 kV/mm und höher wurden dabei deutliche Differenzen zwischen den ermittelten Fließkurven in Abhängigkeit von der Messdauer festgestellt (Bild 33).



Bild 31: Schubspannung als Funktion der Schergeschwindigkeit



Bild 32: Dynamische Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit



Bild 33: Einfluss der Messdauer auf die ermittelte Schubspannung

# Verhalten der Viskosität $\eta$ in Abhängigkeit von der Temperatur

In den nachfolgenden Bildern (Bild 34 bis Bild 37) ist die Abhängigkeit der Viskosität der untersuchten ER-Suspensionen von der Temperatur (V-T-Verhalten) bei verschiedenen elektrischen Feldstärken im Viskositäts-Temperatur-Diagramm (V-T-Diagramm) dargestellt. Das V-T-Diagramm ist eine übliche Darstellungsweise, um das V-T-Verhalten von Ölen zu veranschaulichen. Dabei wird in den nachfolgenden Bildern die Temperatur auf der Abszisse linear und die dynamische Viskosität auf der Ordinate einfach logarithmisch skaliert aufgetragen (s.a. 2.5).

Die Messungen fanden bei konstanten Scherraten von 650 s<sup>-1</sup> über eine Messdauer von 30 Sekunden statt. Aus dem Messbereich wurden über 20 Sekunden die Mittelwerte der dynamischen Viskosität  $\eta$  und der Schubspannung  $\tau$  ermittelt. Unmittelbar vor und nach dem Versuch wurde die Temperatur der Probe mittels Temperaturfühler bestimmt und als Mittelwert zur Auswertung herangezogen. Die Temperaturdifferenzen lagen üblicherweise bei 1 K, bei Versuchen mit hohen Feldstärken aufgrund der kurzen Messdauer jedoch nicht über 5 K.

Für den Fall, dass kein elektrisches Feld anliegt, liegen alle Viskositätswerte annähernd auf einer Geraden. Bei einer Feldstärke von ca. 1 kV/mm ist am Anfang des Temperaturbereiches noch keine Viskositätserhöhung im Vergleich zur jeweiligen Basisviskosität feststellbar. Über den weiteren Verlauf des Temperaturbereiches bleibt die Viskosität der ER-Suspensionen nahezu konstant. Das bedeutet, dass mit einer Feldstärke von 1 kV/mm die Temperaturabhängigkeit des Grundöls vollständig ausgeglichen werden kann.

Bei Feldstärken über 1 kV/mm ist dann bereits am Anfang des Temperaturbereiches ein sprunghafter Anstieg der Viskosität im Vergleich zur jeweiligen Basisviskosität feststellbar. Die jeweiligen Viskositätswerte erhöhen sich dann noch weiter bis zum Ende des Temperaturbereiches. Allerdings stellt sich zum Ende des Temperaturbereiches ein Maximum ein. In Einzelmessungen an Rheobay Al 3565 war bei 80°C, also bei Überschreiten des Temperaturbereiches bereits wieder ein Abfall der Viskosität festzustellen.

Dieser Anstieg der Viskosität auf ein Maximum und der Abfall am Ende des für den Einsatz empfohlenen Temperaturbereiches bzw. über dessen Ende hinaus ist typisch für ER-Suspensionen. Dieser Effekt lässt sich auf die der jeweiligen Formulierung zugefügten Chloride und deren optimalen temperaturabhängigen Wirkungsbereich zurückführen, ist jedoch in seinen chemisch-physikalischen Zusammenhängen noch nicht umfassend geklärt. Bekannt ist, dass Chloride in organischen Ölen in ungelöster Form vorliegen. Diese Chloride dienen als Aktivator der Polyurethanpartikel, indem sie von diesen komplexiert werden. Dieser Prozess erfährt in einem bestimmten Temperaturbereich ein Optimum. Eine ausführliche Erklärung der ablaufenden chemischen Prozesse wird in 5.4.6 und 5.4.7 gegeben.

Weiterhin wurde das V-T-Verhalten eines Gemisches aus Rheobay AI 3565 und Rheobay AI 3566 im Mischungsverhältnis 50:50 untersucht (Bild 36). Nachdem bekannt ist, dass bei 80°C die Viskosität von Rheobay AI 3565 wieder abfällt, war von Interesse, ob die Zumischung von Rheobay AI 3566 in diesem Fall zu einem weiteren Anstieg der Viskosität führt. Das war jedoch nicht der Fall. Da bei 100°C ein weiterer Abfall der Werte zu beobachten ist, wurde auf weitere Versuche bei 120°C verzichtet. Ebenso wurden wegen des geringen ER-Effektes keine Versuche bei 0°C durchgeführt.

Abschließend zu den Betrachtungen zum V-T-Verhalten zeigt Bild 38 einen Vergleich der ER-Suspensionen bei einer Feldstärke von 4 kV/mm. Es ist zu erkennen, dass mit den drei ungemischten ER-Suspensionen ähnliche Viskositätswerte erreichbar sind. Jedoch ist der Temperatureinsatzbereich bedingt durch die chemische Zusammensetzung entsprechend verschoben. Die Ursache hierfür ist im verwendeten Chlorid begründet. Während Lithiumchlorid seinen optimalen Wirkungsbereich zwischen ca. 40°C bis 60°C hat, liegt er bei Zinkchlorid zwischen ca. 80°C bis 120°C. Anders als in Bild 36 wird im direkten Vergleich jedoch deutlich, dass mit dem Gemisch aus Rheobay Al 3565 und Rheobay AI 3566 eine Optimierung der ER-Suspension für den Bereich zwischen 40°C und 100°C möglich scheint. Die für das Gemisch ermittelten Viskositäten sind in diesem Bereich gleich oder größer als die Viskositäten der ungemischten Produkte. Das in Bild 38 dargestellte Ergebnis wird auch im Vergleich mit Messungen bei anderen elektrischen Feldstärken bestätigt.



Bild 34: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von Rheobay AI 3565 im elektrischen Feld

Temperatur [°C]

60

40

nsteuerung: 4 Quadranten, 100 Hz Sinus

20

1

0



Bild 35: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von Rheobay AI 3566 im elektrischen Feld

00 **5 kV/mm** 

6 kV/mm

100

++

80



Bild 36: V-T-Verhalten des Gemisches Rheobay Al 3565 + Rheobay Al 3566 im elektr. Feld



Bild 37: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von NMW ERF44 im elektrischen Feld



Bild 38: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von ER-Suspensionen bei 4 kV/mm im Vergleich

#### Verhalten der Schubspannung $\tau$ bei unterschiedlichen elektrischen Feldstärken

In den nachfolgenden Bildern (Bild 39 bis Bild 43) ist das Verhalten der Schubspannung in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke dargestellt. Die Darstellungsweise entspricht der von Bild 15 unter 2.1.

Für Rheobay AI 3565 ist ein Temperaturbereich von 0°C bis 60°C vorgegeben. Bei 0°C fällt der elektrorheologische Effekt jedoch sehr gering aus (Bild 39). Das Produkt erreicht bei 60°C den maximalen ER-Effekt. Bei 80°C ist dagegen schon wieder eine Verringerung des ER-Effektes festzustellen. Der optimale Einsatzbereich liegt somit zwischen 40°C und 80°C. Mit der Erkenntnis, dass die ER-Suspensionen für einen bestimmten Temperaturbereich optimiert sind, erscheint eine weitere Vermessung außerhalb des vorgegebenen Bereiches nicht sinnvoll.

Das Schubspannungsverhalten von Rheobay Al 3566 wird in Bild 40 für den für das Produkt vorgegebenen Temperaturbereich dargestellt. Das Produkt zeigt bei 100°C bis 120°C den maximalen elektrorheologischen Effekt.



Bild 39: Schubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke für Rheobay AI 3565





Das Schubspannungsverhalten des Gemisches aus Rheobay Al 3565 und Rheobay Al 3566 zeigt ähnlich wie Rheobay Al 3565 ein Maximum der Schubspannung bei 60°C und darüber hinaus einen Abfall bei 80°C bzw. 100°C (Bild 41).

Das Produkt NMW ERF44 wurde für den Temperaturbereich zwischen 40°C und 60°C optimiert (Bild 42). Im Vergleich zu Rheobay AI 3565 wurden jedoch bereits bei 25°C höhere Schubspannungswerte gemessen.

In Bild 43 wird das Schubspannungsverhalten der verschiedenen ER-Suspensionen bei einer Temperatur von 60°C vergleichend gegenüber gestellt. Rheobay Al 3565 sowie das Gemisch aus Rheobay Al 3565 und Rheobay Al 3566 zeigen bei dieser Temperatur bereits ihren maximalen elektrorheologischen Effekt, wogegen die Schubspannung von NMW ERF44 bereits wieder unter ihren Maximalwert abgefallen ist, welcher zwischen 40°C und 50°C liegt. Auch bei 80°C ist Rheobay Al 3565 gegenüber Rheobay Al 3566 überlegen. Rheobay Al 3566 erreicht dagegen seine Maximalwerte erst zwischen 100°C und 120°C.



Bild 41: Schubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke für das Gemisch Rheobay Al 3565 + Rheobay Al 3566



Bild 42: Schubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke für NMW ERF44



Bild 43: Schubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke bei 60°C im Vergleich verschiedener ER-Suspensionen

#### 3.2.3 Verhalten von homogenen ERF bei Einfluss eines elektrischen Feldes

### Allgemeines

Bei den Produkten EPS 3301 und EPS 3301/ISO 32 (siehe Tabelle 2) der homogenen ERF handelte es sich um Rückstellmuster aus früheren Untersuchungen. Neuere Chargen sind kommerziell derzeit nicht verfügbar, da die Entwicklungen auf diesem Gebiet eingestellt wurden. Das Produkt EPS 3301 wies eine sehr hohe Basisviskosität sowie eine klebrige Konsistenz auf. Eigene Messungen ergaben nur einen sehr geringen elektrorheologischen Effekt bei 60°C und einer Feldstärke von 6 kV/mm. Bei niedrigeren Feldstärken konnte kein elektrorheologischer Effekt gemessen werden. Inwieweit dieses Produkt seine Eigenschaften aufgrund von Alterung verloren haben könnte, konnte nicht ermittelt werden. Es wurden daher keine weiteren Messungen an diesem Produkt durchgeführt. Bei Bedarf kann es jedoch mit einem Weißöl entsprechend der ISO-Klassifikation verdünnt werden (Tabelle 5).

# Verhalten der Viskosität $\eta$ bei unterschiedlichen Temperaturen

In Bild 44 ist die Abhängigkeit der Viskosität der homogenen ERF EPS 3301/ISO 32 von der Temperatur bei verschiedenen elektrischen Feldstärken dargestellt. Dabei wird die Temperatur auf der Abszisse linear und die dynamische Viskosität auf der Ordinate einfach logarithmisch skaliert aufgetragen. Die Messwerte wurden wie bereits unter 3.2.2 beschrieben bestimmt.

Homogene ERF zeigen im Gegensatz zu ER-Suspensionen eine Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur, wie sie auch bei herkömmlichen Ölen bekannt ist. Unabhängig von der elektrischen Feldstärke nimmt mit steigender Temperatur die Viskosität ab. Wird die Temperatur logarithmisch skaliert aufgetragen, liegen alle Messwerte einer Feldstärke annähernd auf einer abfallenden Geraden. Auffällig ist vor allem, dass die Viskosität bei 20°C und 0 kV/mm höher ist als bei 120°C und 6 kV/mm.

Es ist weiterhin festzustellen, dass der elektrorheologische Effekt von EPS 3301 / ISO 32 sehr gering ausfällt. Weder konnten die Kennwerte aus dem Produktdatenblatt (2.5, Tabelle 5) auch nur annähernd bestätigt werden, noch wurden vergleichbare Werte wie bei ER-Suspensionen erreicht. Der in den eigenen Untersuchungen gemessene, geringe Effekt ist für technische Anwendungen von untergeordneter Bedeutung. Nur SCHWARZ [Swz1, Swz2] beschreibt eine Lenkhilfe, welche auf homogenen ERF basiert (siehe auch 1.2.7). Aufgrund des geringen elektrorheologischen Effektes wurden keine weiteren Messungen mit anderen Mischungen von EPS 3301 entsprechend der ISO-Klassifikation durchgeführt.



Bild 44: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von EPS 3301/ISO 32 im elektrischen Feld

#### Verhalten der Schubspannung $\tau$ bei unterschiedlichen elektrischen Feldstärken

In Bild 45 ist das Verhalten der Schubspannung in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke dargestellt. Ohne dass ein elektrisches Feld anliegt, fällt die Schubspannung erwartungsgemäß mit steigender Temperatur. Wie auch bei ER-Suspensionen steigt die Schubspannung mit wachsender Feldstärke kontinuierlich an. Jedoch war bei ER-Suspensionen zu beobachten, dass mit Anliegen eines elektrischen Feldes die Schubspannung zusätzlich auch temperaturabhängig ein Optimum einstellte (Bild 39). Weiterhin konnte bei ER-Suspensionen in

Abhängigkeit von der Feldstärke ein deutlicher Anstieg auf Schubspannungen um 1000 Pa gemessen werden (siehe 3.2.2, Bild 39ff). Diese Effekte sind bei homogenen ERF nicht feststellbar.



Bild 45: Schubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke für EPS 3301/ISO 32

3.2.4 Betrachtung zum Temperaturverhalten elektrorheologischer Suspensionen im Vergleich mit bekannten Modellen

Die in der Literatur gefundenen Verfahren zur Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität konventioneller Mineralöle [Ubl1, Rdm1] haben sich für weitere Betrachtungen als ungeeignet erwiesen, da sie von ihrem Ansatz her nicht auf ER-Suspensionen übertragbar sind.

Auf dem Gebiet der intelligenten Flüssigkeiten sind zum Verhalten der dynamischen Viskosität als Funktion der Temperatur bisher nur das Modell für homogene elektrorheologische Flüssigkeiten von SCHWARZ [Swz1] und das Modell für magnetorheologische Suspensionen von ZSCHUNKE [Zsk1] bekannt. Ein Modell für elektrorheologische Suspensionen konnte bis jetzt nicht gefunden werden. Gemeinsam ist allen drei Flüssigkeitstypen, dass die dynamische Viskosität außer von der Temperatur auch noch von der Schergeschwindigkeit und der Feldstärke abhängig ist.

SCHWARZ [Swz1] gibt in seiner Arbeit die Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität homogener ERF bei unterschiedlichen elektrischen Feldstärken und konstanter Schergeschwindigkeit an. Die Temperaturabhängigkeit wurde dabei über den Bereich von 18°C bis 29,5°C aufgenommen. Im Vergleich zu technischen Anwendungen, in welchen ERF einem größeren Temperaturbereich ausgesetzt sind, ist der vermessene Bereich nicht repräsentativ. Im weiteren Verlauf führte SCHWARZ eine Normierung der Temperatur auf T/T<sub>297</sub> und der Viskosität auf  $\eta/\eta_{297}$  durch, wobei die Temperatur von 297 K etwa die Mitte des vermessenen Temperaturbereichs angibt. Mit einer Regressionsfunktion gibt er eine von der elektrischen Feldstärke unabhängige mathematische Beschreibung der Temperaturabhängigkeit  $\eta = f(T)$  gemäß GI. (16) an. Die Einflussparameter Schergeschwindigkeit und elektrische Feldstärke werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Es kann daher auf die in dieser Arbeit untersuchten ER-Suspensionen auch im Hinblick auf die Gültigkeit für größere Temperaturbereiche nicht angewendet werden.

$$\frac{\eta}{\eta_{297}} = \frac{a_0}{\left(1 - \frac{a_2 \cdot T_{297}}{T}\right)^{a_1}}$$
(16)

ZSCHUNKE [Zsk1] stellte zunächst plausible Abhängigkeiten der dynamischen Viskosität von der magnetischen Flussdichte  $B_{magn}$ , der Schergeschwindigkeit D und der Temperatur T fest. Dabei erfasste er die Abhängigkeit der Viskosität von der Flussdichte über die Koeffizienten c<sub>1</sub> und c<sub>2</sub>, wobei c<sub>1</sub> zusätzlich noch den Einfluss der Schergeschwindigkeit wiedergibt. Der Koeffizient c<sub>2</sub> zeigt dabei eine lineare Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte. Daraus ergibt sich eine mathematische Beschreibung der Temperaturabhängigkeit  $\eta = f(T,D,B_{magn})$  gemäß GI. (17).

$$\eta = c_1 \cdot e^{\frac{C_2}{T}}$$
(17)

Generell zeigen homogene elektrorheologische Flüssigkeiten und magnetorheologische Suspensionen ein ähnliches Viskositäts-Temperatur-Verhalten. Die Erhöhung der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke bei konstanter Temperatur bewirkt einen Anstieg der Viskosität. Dagegen fällt die Viskosität bei mit steigender Temperatur, auch wenn ein Steuerfeld anliegt.

Elektrorheologische Suspensionen zeigen im Vergleich dazu ein abweichendes Verhalten (Bild 34 bis Bild 38), welches nicht mit der von ZSCHUNKE angegebenen Funktion korreliert. Auch zeigt sich in Anwendung des Modells von ZSCHUNKE auf die untersuchten elektrorheologischen Suspensionen keine lineare Abhängigkeit des Koeffizienten c<sub>2</sub> von der elektrischen Feldstärke. Zudem ist das Viskositäts-Temperatur-Verhalten elektrorheologischer Suspensionen in dieser Arbeit nur bei konstanter Schergeschwindigkeit untersucht worden, so dass mit den gewonnenen Messwerten weiterhin keine Abhängigkeit des Viskositäts-Temperatur-Verhalten son der Schergeschwindigkeit dargestellt werden kann.

# 4 RHEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG MITTELS FLIEßKANALUNTERSUCHUNG

### 4.1 Verwendete Prüfeinrichtungen

## 4.1.1 Hydraulikprüfstand

Um elektrorheologische Flüssigkeiten unter applikationsnahen Bedingungen, d.h. hohen Schergeschwindigkeiten untersuchen zu können, ist ein hydraulischer Prüfstand erforderlich, in dem die ERF durch typische Spaltgeometrien fließt. Die Spaltgeometrien Ringspalt und Flachspalt entsprechen dabei in ihren Abmessungen (siehe 4.1.2) typischen elektrorheologischen Strömungswiderständen. Mit dem nachfolgend beschriebenen Prüfstand können Untersuchungen sowohl bei Variationen der geometrischen Parameter des ER-Strömungswiderstandes als auch der physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Volumenstrom, elektrisches Feld durchgeführt werden.

In einem Maschinengestell ist das Hydraulikaggregat mit den wesentlichen Komponenten Motor, Pumpe, Flüssigkeitstank, Kühler, Heizung und Sensor für die Durchflussmessung untergebracht. Auf dem Tisch des Maschinengestells sind der ER-Strömungswiderstand (ER-Ventil) sowie die Sensoren für Druck- und Temperaturmessung installiert. Im Schaltschrank befinden sich im wesentlichen die Komponenten Anlagensteuerung, PC und der Hochspannungsverstärker (Bild 46, Bild 47). Ausgewählte technische Daten sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Pumpe	Innenzahnradpumpe Typ PGF2
	Volumenstrom: max. 27 l/min
	Betriebsdruck: 250 bar
	Motor: 3,6 kW / 400 V / 6,6 A / cosφ = 0,81
Drucksensoren	0 bis 60 bar / 0 bis 10 V
Temperatursensoren	-20 bis +120°C / 0 bis 10 V
Durchflussmessung	Zahnradvolumenstromsensor: ±30 l/min



Bild 46: ERF-Hydraulikprüfstand, schematisch [Flu6]



Bild 47: Hydraulikschaltplan des ERF-Hydraulikprüfstandes

Beim Betrieb des Prüfstandes wird zwischen zwei Betriebsarten unterschieden:

- 1. Spülkreislauf,
- 2. Vermessung der ERF im ER-Strömungswiderstand.

Der Spülkreislauf dient zum Spülen der Leitungen und zum Aufmischen der ERF im Tank. Die ERF wird bei geschlossenem Proportionalventil durch die wesentlichen Druck- und Tankleitungen des Prüfstands gepumpt, der ER-Strömungswiderstand wird dabei jedoch nicht durchflossen. Das Aufmischen ist vor allem nach mehrstündigem Stillstand des Prüfstandes erforderlich, um eine gleichmäßige Verteilung der Partikel in der ERF gewährleisten zu können.

Zur Vermessung wird die ERF bei geschlossenem Spülkreislauf durch den ER-Strömungswiderstand gepumpt. Der Volumenstrom wird dabei über ein hydraulisches Proportionalventil eingestellt und über den Volumenstromsensor erfasst. Weiterhin kann über das Proportionalventil die Durchflussrichtung geändert werden. Drücke und Temperaturen der ERF werden vor und nach dem durchströmten Strömungswiderstand gemessen. Durch Variation der Steuerspannung an der Hochspannungsquelle kann das Fließverhalten der ERF im Strömungswiderstand verändert werden.

Im Rücklauf befindet sich ein Kühler, dessen Kühlwasserzufuhr über einen im Tank angeordneten Zweipunktregler geregelt wird. Die Einstellung der gewünschten Prüftemperatur erfolgte über die Eigenerwärmung der ERF im Betrieb und eine Kühlung bei Überschreitung der eingestellten Prüftemperatur. Weiterhin ist im Tank eine Heizung installiert, auf deren Benutzung letztlich jedoch verzichtet werden konnte.

#### 4.1.2 Ventilgeometrien

Wesentliche Voraussetzung für die rheologische Charakterisierung von ERF im Fließkanal war die Möglichkeit der Variation der geometrischen Parameter des ER-Strömungswiderstandes. Es standen verschiedene Ventilgeometrien zur Verfügung, welche im Verlauf der Untersuchungen sukzessiv erweitert wurden. Wegen der definierten Geometrie wird der ER-Strömungswiderstand an verschiedenen Stellen auch als Normspaltventil und der Hydraulikprüfstand als Normspaltprüfstand bezeichnet [Flu6]. Aufgrund der einfachen Konstruktion und
Fertigung wurden die Ventilgeometrien als Ringspaltventile ausgeführt. Der Aufbau eines Ringspaltventils ist in Bild 48 in der Schnittdarstellung und im demontierten Zustand in Bild 49 zu sehen. Die Dornelektrode ist in Ein- und Austrittsströmungsmodulen gelagert, welche wiederum gegen die Ein- und Austrittsmodule elektrisch isoliert sind. Die Ein- und Austrittsströmungsmodule weisen je vier axial angeordnete, nierenförmige Öffnungen auf, durch welche die ERF hindurchströmen kann. Deshalb bewegt sich die Flüssigkeit vom Eintritt bis zum Austritt aus dem gesamten Ringspalt nahezu ausschließlich in axialer Richtung. Die Ausbildung radialer Geschwindigkeitskomponenten im Bereich des aktiven elektrischen Feldes kann somit ausgeschlossen werden. Dornelektrode und Zwischengehäuse bilden mit ihrer geometrischen Form einen Ringspalt mit den Abmessungen Durchmesser, Spaltlänge und Spalthöhe. Die Spaltlänge bezieht sich dabei auf die Länge des homogenen Spaltes mit konstanter Spalthöhe. Die Spaltbreite ermittelt sich aus dem mittleren Durchmesser des Kreisringes.

Der Mittenrauhwert der geschliffenen Dornelektrode beträgt  $R_a = 0.8 \mu m$ . Der Innendurchmesser des Zwischengehäuses wird durch Honen mit einem Mittenrauhwert  $R_a = 0.8 \mu m$  fertiggestellt.



Bild 48: ER-Strömungswiderstand, Schnittdarstellung [Flu6]



Bild 49: ER-Strömungswiderstand ohne Hochspannungsversorgung, demontiert [Flu6]

Die Konstruktion des Ringspaltventils gewährleistet eine einfache Montage und Demontage, so dass zur Variation der geometrischen Parameter jeweils nur Dornelektrode und Zwischengehäuse ausgetauscht werden müssen, wogegen das Ein- und Austrittsmodul nur in einer Ausfertigung benötigt wird.

Die Abmessungen der verwendeten Strömungswiderstände sind in Tabelle 8 aufgeführt. Aus Gründen des erforderlichen Fertigungsaufwandes für die verschiedenen Geometrien wurden für jede Länge der Zwischengehäuse jeweils zwei Dornelektroden mit unterschiedlichem Durchmesser gefertigt. Da bei Verwendung des gleichen Zwischengehäuses der Durchmesser D<sub>a</sub> gleich blieb und sich lediglich der Durchmesser der Dornelektrode D<sub>i</sub> änderte, ergibt sich folglich, dass mit der Veränderung der Spalthöhe H auch eine Veränderung des mittleren Durchmessers D<sub>m</sub> einhergeht.

Bei der Geometrie der Länge L = 300 mm handelt es sich um eine Sondergeometrie mit vier Bohrungen zum Anschluss der Drucksensoren, verteilt im Abstand von je 50 mm über dem homogen Spalt.

Geometrieform	Durchmesser			Länge	Höhe	Breite	Querschnitt
	Da	Di	D <sub>m</sub>	L	н	В	А
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
Ringspalt	30,7	29,3	30,0	100	0,7	94,25	65,97
Ringspalt	30,7	28,7	29,7	100	1,0	93,31	93,31
Ringspalt	30,7	29,3	30,0	150	0,7	94,25	65,97
Ringspalt	30,7	28,7	29,7	150	1,0	93,31	93,31
Ringspalt	30,7	29,3	30,0	200	0,7	94,25	65,97
Ringspalt	30,7	28,7	29,7	200	1,0	93,31	93,31
Ringspalt	30,7	29,3	30,0	300	0,7	94,25	65,97
Ringspalt	41	39	40	100	1,0	125,66	125,66

#### Tabelle 8: Abmessungen der ER-Strömungswiderstände

Der Strömungswiderstand wird mit Steckverbindungen an die hydraulischen Leitungen des Prüfstandes angeschlossen. Die Temperatursensoren sind stationär in den hydraulischen Leitungen nahe der beiden Steckverbindungen montiert. Der Druck vor und nach dem Strömungswiderstand wird über Sensoren erfasst, welche am Ein- und Austrittsmodul angeschlossen sind. Die Spannungsversorgung erfolgt über den Hochspannungsanschluss am Ventil. Dazu ist das vom Schaltschrank kommende Hochspannungskabel mit dem Stecker des Hochspannungsanschlusses zu verbinden. Weiterhin muss vor dem Einschalten des Hochspannungsverstärkers das Erdungskabel mit dem Normspaltventil verbunden sein.

# 4.1.3 Steuerung und Messdatenerfassung

Während die geometrischen Parameter zu Beginn des Versuches durch den Aufbau des Strömungswiderstandes eingestellt werden, kann die Variation der physikalischen Größen Druck, Volumenstrom und elektrische Steuerspannung über die Steuerung des Prüfstandes erfolgen. Weiterhin wird die Temperatur der ERF über den Zweipunktregler der Tanktemperaturmessung eingestellt.

Die Steuerung und Regelung des Prüfstandes erfolgt über den im Schaltschrank integrierten PC durch zwei Echtzeitprogramme für die Schnittstellen Prüfstand-Rechner und Rechner-Bediener.

Die Messdatenerfassungskarte als Schnittstelle Prüfstand-Rechner ist durch ein eigenes Echtzeitbetriebssystem in der Lage, die Regelung im Echtzeitbetrieb unabhängig von der Auslastung des Computers durchzuführen. Das Echtzeitprogramm für die Messdatenerfassungskarte erfüllt im wesentlichen folgende Aufgaben [Flu6]:

- Berechnen der Sollfunktionen, welche an den Hochspannungsverstärker ausgegeben werden,
- Ordnen der Eingänge und Übergabe an das Messprogramm, welches gleichzeitig auf dem Rechner abläuft,
- Ordnen der Ausgänge und Übernahme vom Messprogramm,
- Ansteuerung des Regelventils zur Volumenstromregelung mit Hilfe des implementierten PID-Reglers.

Die Schnittstelle Rechner-Bediener wurde mit Hilfe der graphischen Programmieroberfläche LabVIEW programmiert. Die Aufgaben dieses Programms sind im wesentlichen folgende [Flu6]:

- Installation des Betriebssystems und des Echtzeitprogramms auf der Messdatenerfassungskarte,
- Initialisierung,
- Eingabeoberfläche für Regelparameter,
- Eingabeoberfläche für Parameter der Sollfunktionen,
- Visualisierung der Signalein- und Signalausgänge,
- Einfügen der Datenbeschriftung in die gespeicherten Messdaten.

Weiterhin ist im Schaltschrank die Hochspannungsquelle RheCon installiert. Diese Hochspannungsquelle wurde speziell zur Erzeugung von statischen und modulierten elektrischen Feldern in elektrorheologischen Flüssigkeiten entwickelt. Sie vereint die Modulationsmöglichkeiten eines Verstärkers mit dem hohen Wirkungsgrad eines Netzteiles. Eine Gegenüberstellung der Leistungsparameter des RheCon [Flu2] mit der Hochspannungsquelle SVU 6000/16 Q erfolgt in Tabelle 9.

Hochspannungsquelle	RheCon	SVU 6000/16 Q	
Einsatz	ERF-Hydraulikprüfstand	Rheometer	
Eingangssignal	0 – 6 V	0 – 6 V	
Spannungsversorgung	230 V AC	20 bis 32 V DC	
Ausgangsspannung	0 – 6 kV DC	0 – 6 kV AC	
Ausgangsdauerstrom	≥ 20 mA	16 mA	
Maximale Ausgangsleistung	120 W	100 W je Quelle/Senke	
Anstiegszeit / Abfallzeit	0,3 ms	1 ms	
(1090% Umax)	(Last 500 k $\Omega$ / 1 nF)	(Last 500 k $\Omega$ / 1 nF)	

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Hochspannungsquellen RheCon und SVU 6000/16 Q

Ein wesentliches Merkmal der Hochspannungsquelle RheCon ist, dass sowohl elektrische Überschläge (Flash Over) in der ERF als auch ein Überschreiten der maximalen Ausgangsleistung (Overload) erfasst und angezeigt werden. Durch eine schnelle Lichtbogenerkennung (Flash Over) und die gezielte, kurzzeitige Abschaltung der Spannung zur Unterdrückung des Lichtbogens werden die ERF und die Elektroden vor Zerstörungen geschützt [Flu2].

# 4.2 Vorbetrachtungen zu den experimentellen Untersuchungen

# 4.2.1 Berechnungsformeln zur Auslegung von ER-Strömungswiderständen

Die wesentlichen Größen, welche bei den Prüfstandsuntersuchungen vorgegeben wurden, sind der Volumenstrom Q und die Steuerspannung U. Weiterhin wurden die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  sowie die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  vor und nach dem Spalt und der Strom I gemessen. Aus diesen Messwerten können alle weiteren physikalischen Größen abgeleitet werden. Da diese in alle nachfolgenden Betrachtungen einfließen, werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Berechnungsformeln zur Auslegung von ER-Strömungswiderständen aufgeführt.

Entsprechend Bild 50 ergibt sich die Druckdifferenz  $\Delta p$  aus dem Betrag von  $p_1$  und  $p_2$  gemäß Gl. (18) und die mittlere Temperatur T der Probe gemäß Gl. (19).

$$\Delta p = |p_1 - p_2| \tag{18}$$

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$
(19)



Bild 50: Messung der Druckdifferenz über eine ER-Strömungswiderstand [Zau2]

Der Ringspalt eines ER-Strömungswiderstandes wird durch die geometrischen Größen B, H und L bestimmt, wobei die Breite B die Abwicklung der Geometrie des Ringspalts mit dem mittleren Durchmesser D<sub>m</sub> zum Flachspalt gemäß Gl. (20) darstellt.

$$B = \pi \cdot D_m \tag{20}$$

Bei Anwendung der Gleichung nach HAGEN-POISEUILLE [Mur1, Pra1] und unter der Annahme, dass es sich um eine newtonsche Flüssigkeit handelt, ergibt sich aus dem Volumenstrom Q, der Spaltbreite B und der Spalthöhe H die maximale wahre Wandschergeschwindigkeit D<sub>w</sub> gemäß nachfolgender Beziehung (Gl. (21)). Handelt es sich um eine nicht-newtonsche Flüssigkeit, wird über Gl. (21) lediglich die scheinbare Wandschergeschwindigkeit D<sub>s</sub> ermittelt. Die Ermittlung der wahren Wandschergeschwindigkeit D<sub>w</sub> erfolgt dann über das Korrekturverfahren nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH [Rab1, Böh1]. Alternativ steht das Verfahren der repräsentativen Schergeschwindigkeit nach SCHÜMMER zur Verfügung [Pah1, Mch1]. Beide Verfahren werden ab Seite 67f beschrieben.

$$D_W = \frac{6 \cdot Q}{B \cdot H^2} \tag{21}$$

Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsprofil und Schubspannungsverlauf wird in Bild 51 verdeutlicht. Die Darstellung gilt für eine voll ausgebildete Rohrströmung, lässt sich aber auf einen Flachspalt unendlicher Breite übertragen, indem der in Bild 51 angegebene Rohrdurchmesser d durch die Spalthöhe H ersetzt wird. Demnach tritt der betragsmäßig größte Schubspannungswert an der Wand auf und berechnet sich stoffunabhängig aus Druckdifferenz  $\Delta p$ , Spalthöhe H und Spaltlänge L gemäß GI. (22) [Böh1].

$$\tau_W = \frac{H}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \tag{22}$$



Bild 51: Voll ausgebildete Rohrströmung [Böh1]

Ebenfalls unter Anwendung der Gleichung nach HAGEN-POISEUILLE und unter der Annahme, dass es sich um eine newtonsche Flüssigkeit handelt, lässt sich unter Einbeziehung der Druckdifferenz  $\Delta p$  mit GI. (23) die dynamische Viskosität  $\eta$  berechnen [Mur1]. Im Fall von nicht-newtonschen Flüssigkeiten wird mit GI. (23) die scheinbare dynamische Viskosität ermittelt.

$$\eta = \frac{B \cdot H^3}{12 \cdot L \cdot Q} \cdot \Delta p \tag{23}$$

Die elektrische Feldstärke E ist abhängig von der angelegten Steuerspannung U und variiert mit der Spalthöhe H (Gl. (24)).

$$E = \frac{U}{H}$$
(24)

Dagegen bezieht sich die Stromdichte J auf die vom Strom I durchflossene Fläche der Spaltgeometrie (Gl. (25)).

$$J = \frac{I}{B \cdot L}$$
(25)

#### 4.2.2 Weiterführende Betrachtungen zu Messungen mit Kapillarviskosimetern

Zur Bestimmung der Viskosität sind Kapillar-Viskosimeter bekannt, bei denen die zu untersuchende Flüssigkeit meist unter dem Einfluss der eigenen Schwere laminar durch eine senkrechte Kapillare strömt. So wird bei einem Viskosimeter nach DIN 51562-1 [DIN8] die Zeit t gemessen, die ein durch zwei Ringmarken begrenztes Volumen V der zu messenden Flüssigkeit benötigt, um unter dem Einfluss der Schwerkraft laminar durch eine kreisförmige Kapillare zu strömen. Dabei hängt der Volumenstrom Q vom Radius R des Rohres, von der Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen zwei Punkten der Rohrachse im Abstand L und von der dynamischen Viskosität  $\eta$  der Flüssigkeit ab. Für diesen Fall gilt nach HAGEN-POISEUILLE folgende Beziehung (Gl. (26)):

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R^4 \cdot \Delta p}{\eta \cdot L}$$
(26)

Die Druckdifferenz ∆p ist dabei durch das Gewicht der Flüssigkeit bedingt. Fließt eine newtonsche Flüssigkeit durch Kapillare unterschiedlichen Querschnitts oder verschiedener Länge, wird aus den Eingangs- und Messgrößen immer die gleiche Viskosität ermittelt.

Werden jedoch Viskositäten und/oder Geschwindigkeitsgefälle aus den Messwerten der Druckdifferenz ∆p und des Volumenstromes Q an nichtnewtonschen Flüssigkeiten mit Hilfe von Beziehungen berechnet, die nur für newtonsche Flüssigkeiten gelten, so werden sie als scheinbare Viskositäten bzw. Geschwindigkeitsgefälle bezeichnet [DIN9]. Für Flüssigkeiten mit unbekanntem Fließverhalten ergibt sich somit der Bedarf der Korrektur der scheinbaren in eine wahre Fließkurve [Böh1]. Dabei finden folgende zwei Verfahren Anwendung.

# a) Verfahren nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH [Böh1, Pah1]

Das Verfahren nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH berücksichtigt das strukturviskose Verhalten nicht-newtonscher Flüssigkeiten. Unter der Voraussetzung der Wandhaftung hat das Geschwindigkeitsprofil im Zentrum der Kapillare ein Maximum und fällt an der Kapillarwand auf Null ab. Für newtonsche Flüssigkeiten ist der Geschwindigkeitsgradient vom Zentrum der Kapillare zur Wand proportional zur Schergeschwindigkeit (Bild 51). Nicht-newtonsche Flüssigkeiten zeigen insbesondere bei hohen Volumenströmen einen wesentlich größeren Geschwindigkeitsgradienten in Wandnähe als newtonsche Flüssigkeiten.

Aufbauend auf den Untersuchungen von RABINOWITSCH und WEISSENBERG [Rab1] wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem für beliebige Flüssigkeiten mit Wandhaftung die wahre Schergeschwindigkeit an der Rohrwand aus der scheinbaren berechnet werden kann. Nach der dynamischen oder quasistatischen Aufnahme des Druckgradienten  $\Delta p/L$  nach Vorgabe eines durch die Ring- oder Flachspaltkapillare hindurch tretenden Volumenstroms Q berechnet man aus den Wertepaaren die Zustandsgrößen scheinbare Wandschergeschwindigkeit D<sub>S</sub> gemäß Gl. (21) und wahre Wandschubspannung  $\tau_W$  gemäß Gl. (22). Der Zusammenhang D<sub>S</sub> = f( $\tau_W$ ) wird gelegentlich als scheinbare Fließkurve bezeichnet (Bild 52).



Bild 52: Ermittlung der wahren Schergeschwindigkeit nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH

Anschließend erfolgt die Approximation der scheinbaren Fließkurve durch einen geeigneten mathematischen Ansatz sowie die Berechnung der Steigung  $dD_s/d\tau_W$  in den gemessenen Punkten der scheinbaren Fließkurve. Die wahre Wandschergeschwindigkeit  $D_W$  berechnet sich gemäß Gl. (27). Den Zusammenhang zwischen wahrer und scheinbarer Schergeschwindigkeit als Funktion der Wandschubspannung zeigt Bild 52.

$$D_{W} = \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\tau_{W}}{D_{S}} \cdot \frac{dD_{S}}{d\tau_{W}}\right) \cdot D_{S}$$
<sup>(27)</sup>

### b) Verfahren nach SCHÜMMER [Pah1, Mch1]

Das Verfahren der repräsentativen Schergeschwindigkeit nach SCHÜMMER soll an dieser Stelle nur ansatzweise erwähnt werden, da es in der weiteren Arbeit nicht verwendet wird. Entsprechend Bild 53 ist die Schergeschwindigkeit eines strukturviskosen Stoffes bei gleichem Volumenstrom an der Wand größer als die Schergeschwindigkeit eines Newtonschen Stoffes. Es wird nun davon ausgegangen, dass es eine Stelle im Fließkanal gibt, wo die Schergeschwindigkeiten einer newtonschen und einer nicht-newtonschen Flüssigkeit gleich sind, wenn man den gleichen Volumenstrom Q annimmt. Die Lage des Schnittpunkts wird über den Verschiebungsfaktor e<sub>0</sub> bestimmt. Dieser wird zwar mit guter Genauigkeit als konstant angesehen [Mch1], sollte aber in der Praxis für jeden Stoff neu berechnet werden [Pah1].





# 4.2.3 Einlauf- und Auslaufdruckverluste

Um ein homogenes Feld über den ER-Spalt zu gewährleisten, sind die Drucksensoren außerhalb des homogenen Spaltes am Ein- und Austrittsmodul angeschlossen. Das bedeutet, dass bei einer Länge des homogenen Spaltes L die beiden Drucksensoren in einem Abstand L + 142 mm angeordnet sind. Da als Bezugsgröße für die gemessene Druckdifferenz die Länge L des homogenen ER-Spaltes von Bedeutung ist, die Drucksensoren jedoch über einen größeren Abstand angeordnet sind, ist eine Betrachtung der Einlauf- und Auslaufkorrektur von Bedeutung.

In laminar durchströmten Kanälen mit konstantem Querschnitt, also im homogen ER-Spalt, ist der Druckgradient ∆p/L konstant. Im Ein- und Auslauf treten jedoch Abweichungen auf, welche auf nachfolgenden Änderungen beruhen und durch verschiedene Verfahren korrigiert werden können [Pah1]:

- Änderung der Strömungsgeschwindigkeit (HAGENBACH-Korrektur),
- Änderung der Reibungsbedingungen (COUETTE-Korrektur),
- Wirbelbildung und elastische Effekte (BAGLEY-Korrektur).

Die entsprechenden Korrekturverfahren werden von PAHL [Pah1] und MICHAELI [Mch1] beschrieben. Demnach müssen für niedrigviskose Flüssigkeiten bei Kapillaren mit einem L/D-Verhältnis  $\approx$  10 bis 100 Einlaufeffekte mittels HAGENBACH-Korrektur berücksichtigt werden [Pah1]. Dagegen findet die BAGLEY-Korrektur vor allem bei Flüssigkeiten mit ausgeprägtem viskoelastischen Fließverhalten Anwendung, wobei der Einlaufdruckverlust als eine Funktion des L/D-Verhältnisses angegeben wird [Mch1]. In diesem Zusammenhang ist die Frage nach dem L/D-Verhältnis für die verwendeten Ringspaltgeometrien zu klären. Da sich die oben gemachten Angaben zum L/D-Verhältnis auf die Kreiskapillare mit einer Fläche  $A_K$  (Gl. (28)) beziehen, muss aus der Fläche  $A_R$  des Ringspaltes (Gl. (29)) unter der Bedingung  $A_{\rm K} = A_{\rm R}$ zunächst ein Ersatzdurchmesser  $D_E$  für die Ringspaltgeometrie ermittelt werden (Gl. (30)).

$$A_{\mathcal{K}} = \frac{\pi}{4} D^2 \tag{28}$$

69

$$A_R = \frac{\pi}{4} \left( D_a^2 - D_i^2 \right) \tag{29}$$

$$D_E = \sqrt{D_a^2 - D_i^2}$$
(30)

Demnach ergeben sich für die verwendeten Geometrien die in Tabelle 10 aufgeführten Werte für das L/D<sub>E</sub>-Verhältnis.

L	100	100	100	150	150	200	200
Da	41	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7
D <sub>i</sub>	39	28,7	29,3	28,7	29,3	28,7	29,3
н	1	1	0,7	1	0,7	1	0,7
D <sub>E</sub>	12,65	10,90	9,17	10,90	9,17	10,90	9,17
L/D <sub>E</sub> -Verhältnis	7,9	9,2	10,9	13,8	16,4	18,3	21,8

Tabelle 10: L/D-Verhältnis der verwendeten Geometrien

Der Querschnitt im Ein- und Austrittsmodul sowie der Übergang zum homogenen Spalt des ER-Strömungswiderstandes wurde in vorangegangenen Untersuchungen im Hinblick auf die sich einstellenden Strömungsverhältnisse optimiert [Zau1, Zau4]. Der geringste Querschnitt unmittelbar vor und nach dem homogenen Spalt wird durch die Ein- und Austrittsströmungsmodule vorgegeben. Die je vier nierenförmigen Öffnungen geben jeweils einen Querschnitt von 367,9 mm<sup>2</sup> frei. Dem stehen die jeweiligen Querschnitte der verschiedenen Spaltgeometrien gemäß Tabelle 8 gegenüber.

Um jedoch die Einlauf- und Auslaufströmungsdruckverluste messtechnisch zu erfassen, wurde für eigene Untersuchungen eine Sondergeometrie eines ER-Strömungswiderstandes hergestellt. Die Länge des homogenen Spaltes beträgt dabei 300 mm bei einem mittleren Durchmesser von 30 mm und einer Spalthöhe von 0,7 mm. Über den homogenen Spalt waren in Abständen Bohrungen zur Aufnahme der Drucksensoren angeordnet, so dass die Druckdifferenz im homogenen Spalt in Abständen von 100, 150 und 200 mm gemessen werden konnte. Weiterhin wurde die Druckdifferenz zwischen Ein- und Austrittsmodul über einen Abstand von L = (300 + 142) mm = 442 mm gemessen und mit der rechnerischen Druckdifferenz des homogenen Spaltes L = 300 mm verglichen. Für Messungen der Gesamtdruckdifferenz an unterschiedlich langen Kapillaren mit gleichem Radius ergibt sich ein Zusammenhang entsprechend GI. (31) [Pah1]. Demnach lässt sich bei bekannten Längen L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> und den dazu gehörigen, gemessenen Druckdifferenzen  $\Delta p_1$  und  $\Delta p_2$  die Druckdifferenz  $\Delta p$  für eine dritte Länge L oder aus einer gemessenen dritten Druckdifferenz  $\Delta p$  die Länge L der Kapillare berechnen.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{L_1 - L_2} \tag{31}$$

Unter Anwendung von GI. (31) wurde aus den bei E = 0 kV/mm gemessenen Druckdifferenzen der Längen L = 100, 150 und 200 mm die Druckdifferenz für L = 300 mm berechnet. Ein Vergleich zwischen für L = 442 mm gemessener und für L = 300 mm berechneter Druckdifferenz zeigt eine hinreichende Übereinstimmung für den Fall, dass kein elektrisches Feld anliegt (Bild 54).



Bild 54: Vergleich der Druckdifferenzen bei Messung im und außerhalb des ER-Spaltes

Die gewonnenen Messwerte wurden weiterhin in einem ∆p-L/D-Diagramm aufgetragen (Bild 55), wie es für die BAGLEY-Korrektur verwendet wird [Mch1].

Die Messwerte bei den Längen L =100, 150 und 200 mm im homogenen Spalt und bei der Länge L = 442 mm außerhalb des homogenen Spaltes liegen annähernd auf einer Geraden. Extrapoliert auf die Kapillarlänge Null (L/D = 0) beginnt die Gerade nahezu im Ursprung. Das bedeutet, dass bei einer Feldstärke von E = 0 kV/mm kein längenunabhängiger Einlaufdruckverlust gemessen wurde.

Die HAGENBACH- und COUETTE-Korrektur werden im praktischen Fall gleichzeitig mit einem empirisch zu bestimmenden Faktor durchgeführt [Pah1]. Da jedoch aufgrund der vorliegenden Verhältnisse die Einlauf- und Auslaufdruckverluste einen kaum messbaren Einfluss haben, wird dieser zur Vereinfachung der weiteren Betrachtungen vernachlässigt.



Bild 55: Überprüfung des Einlaufdruckverlustes anhand der BAGLEY-Korrektur

Die in diesem Abschnitt durchgeführten Betrachtungen wurden nur für den Fall E = 0 kV/mm angestellt. Wie unter 4.5.2 noch weiter ausgeführt wird, weist die verwendete ERF44 eine sehr hohe Stromaufnahme auf. Das führt bei größer werdenden Spaltlängen regelmäßig zur Überlastung der Hochspannungsversorgung. So sind beispielsweise bei einer Temperatur von 40°C und einer Geometrie mit den Abmessungen D = 30 mm, L = 100 mm und H = 0,7 mm noch

Messungen bei einer Feldstärke von 4 kV/mm ohne Überlastung der Hochspannungsquelle möglich. Dagegen reduziert sich die maximal einstellbare Feldstärke bei einer Geometrie mit den Abmessungen D = 30 mm, L = 200 mm und H = 0,7 mm bereits auf 2 kV/mm. Mit der verwendeten ERF 44 können somit keine Messungen zu Einlauf- und Auslaufdruckverlusten an der Sondergeometrie mit der Länge L = 300 mm unter Einfluss eines elektrischen Feldes durchgeführt werden. Die Notwendigkeit einer BAGLEY-Korrektur bei Feldstärken E > 0 kV/mm kann somit also nicht vollständig ausgeschlossen werden.

# 4.3 Methodik zur Aufnahme von Fließkurven

4.3.1 Vorgabe einer konstanten Feldstärke bei Variation des Volumenstroms Bei den unter diesem Punkt beschriebenen Messungen handelt es sich um die dynamische Aufnahme von Fließkurven. Nach Einstellung der Prüftemperatur wird eine konstante Steuerspannung vorgegeben. Während der Messung wird der Volumenstrom in Form einer Rampe von Null auf den maximal möglichen Wert gesteigert, gehalten und wieder auf Null reduziert. Der zeitliche Verlauf dieser Vorgabe wird in Bild 56-A dargestellt. Neben den Vorgabeparametern Volumenstrom und Steuerspannung werden weiterhin der Druck vor und nach dem ER-Strömungswiderstand und die Stromstärke gemessen. Der zeitliche Verlauf der Druckdifferenz als Reaktion auf die Veränderung des Volumenstroms wird in Bild 56-B dargestellt. Unter Anwendung der unter 4.2.1 aufgeführten Gleichungen werden die Wandschubspannung und die Schergeschwindigkeit ermittelt. Wird nun die Wandschubspannung als Funktion der Schergeschwindigkeit dargestellt, ergibt sich ein Zusammenhang gemäß Bild 56-C. Darin ist erkennbar, dass zunächst eine Fließgrenzspannung überwunden werden muss, bevor ein Fließen der ERF einsetzt.

Diese Form der Messung wurde bereits in mehreren vorangegangenen Arbeiten angewendet [Wol1, Wol2, Fes1, Zau4], wobei dort an Stelle von Wandschubspannung und Schergeschwindigkeit die Druckdifferenz als Funktion des Volumenstroms dargestellt wurde. Aus diesen Untersuchungen resultiert auch das unter 2.3.3 erwähnte phänomenologische Modell von WOLFF-JESSE und FEES (Gl. (8)).



Bild 56: Ablauf einer Messung bei Vorgabe einer Volumenstromrampe

Bild 57 zeigt den Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Wandschubspannung als Funktion der scheinbaren Schergeschwindigkeit. Deutlich wird auch hier die signifikante Erhöhung der Wandschubspannung durch die Erhöhung der elektrischen Feldstärke. Auffällig ist hier jedoch bereits das Einschwingverhalten der Wandschubspannung bei 3 und 4 kV/mm. Außerdem scheint sich bei Feldstärken ab 2 kV/mm eine konstante, von der Schergeschwindigkeit unabhängige Wandschubspannung einzustellen (siehe auch Bild 58). Beide Effekte, das Einschwingverhalten und die Konstanz der Wandschubspannung, wurden bereits durch WOLFF-JESSE und FEES [Wol2] beobachtet.



Bild 57: Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Wandschubspannung

Betrachtet man nun den Einfluss der geometrischen Parameter, wird zunächst deutlich, dass die Druckdifferenz über den Spalt mit kleiner werdendem Querschnitt und größer werdender Länge ansteigt. Weiterhin fällt jedoch auf, dass auch die ermittelten Wandschubspannungen von der Geometrie abhängig zu sein scheinen (Bild 58). Es ist bekannt, dass sich über Kapillaren unterschiedlichen Querschnitts und unterschiedlicher Länge in Abhängigkeit von der Geometrie auch unterschiedliche Druckdifferenzen über die Kapillare einstellen. Insofern entspricht die Abhängigkeit der Druckdifferenz von den geometrischen Parametern, wie sie in Bild 58 dargestellt wird, den physikalischen Gegebenheiten. Fließt eine Flüssigkeit jedoch durch Kapillare unterschiedlicher Geometrie, bleibt dabei ihre Viskosität unverändert. Das heißt, dass sich bei Berechnung der Schergeschwindigkeit gemäß Gl. (21) und der Wandschubspannung gemäß Gl. (22) durch die Einbeziehung der geometrischen Parameter geometrieunabhängige Kennwerte ergeben müssten. Wie in Bild 58 zu sehen, ist dies jedoch nicht der Fall. Auch eine Korrektur der scheinbaren Fließkurve in eine wahre Fließkurve nach dem Verfahren von WEISSENBERG-RABINOWITSCH brachte diesbezüglich keine Übereinstimmung.



Bild 58: Vergleich des Geometrieeinflusses auf Druckdifferenz und Wandschubspannung als Funktion des Volumenstroms bzw. der Schergeschwindigkeit

Das Einschwingverhalten, die scheinbare Geometrieabhängigkeit der Wandschubspannung und die teilweise auftretende Konstanz der Wandschubspannung entsprechen nicht den physikalischen Erfahrungen zum Fließverhalten von Flüssigkeiten in Kapillaren. Betrachtet man nun jedoch noch einmal den zeitlichen Verlauf der Druckdifferenz im Vergleich zum Volumenstrom in Bild 56-B, so fällt auf, dass die Druckdifferenz zunächst steiler ansteigt als der Volumenstrom und bereits einen konstanten Wert angenommen hat, während der Volumenstrom noch ansteigt. Bei höheren Feldstärken wurde dabei auch ein Überschwingen der Druckdifferenz festgestellt. Außerdem wurde im Verlauf der Fließkurven zwischen dem ansteigenden und abfallenden Teil der Volumenstromrampe Hysterese festgestellt. Es wurde bereits früher beobachtet, dass Hysterese entweder durch die dynamische Änderung der Schergeschwindigkeit oder durch die Änderung der elektrischen Feldstärke verursacht wurde [Han1]. Daraus ergibt sich der Schluss, dass bei Vorgabe einer konstanten Feldstärke und zeitabhängiger Variation des Volumenstroms nicht ausschließlich das Fließverhalten der ERF, sondern auch die Systemdynamik gemessen wird. Bedingt durch regelungstechnische Restriktionen am Prüfstand war es nicht möglich, einen flacheren Verlauf der Änderung des Volumenstroms vorzugeben, als in Bild 56-A dargestellt ist. Somit eignet sich dieses Verfahren zwar zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems, jedoch nicht zur Aufnahme von Fließkurven und zur geometrieunabhängigen Ermittlung von Materialkennwerten.

Berechnet man aus der gemessenen Druckdifferenz  $\Delta p$  und dem Volumenstrom Q die scheinbare dynamische Viskosität  $\eta_s$  entsprechend GI. (23) in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern, so ergibt sich eine Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit entsprechend Bild 59.



#### Bild 59: Scheinbare Viskosität als geometrieabhängige Funktion der Schergeschwindigkeit

Auch diese Ergebnisse werden durch das dynamische Verhalten des Gesamtsystems beeinflusst. Der Einfluss der Geometrie wird im Detailausschnitt in Bild 59 sichtbar. Dabei wird im Detailausschnitt der im Vergleich zum Rheometer interessante Bereich der Schergeschwindigkeit von 500 bis 1000 s<sup>-1</sup> dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Geometrien würden sich jedoch auch bei höheren Schergeschwindigkeiten unterscheiden. Weiterführende Betrachtungen zur Viskosität erfolgen im Abschnitt 4.5.1.

## 4.3.2 Vorgabe eines konstanten Volumenstroms bei Variation der Feldstärke

Bei den unter diesem Punkt beschriebenen Messungen handelt es sich um die dynamische Aufnahme der Wandschubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke. Nach Einstellung der Prüftemperatur wird zunächst ein konstanter Volumenstrom vorgegeben. Während der Messung wird die Steuerspannung in Form einer Rampe von Null auf den maximal möglichen Wert gesteigert und wieder auf Null reduziert. Als maximal möglicher Wert wurde die elektrische Feldstärke gewählt, welche in Abhängigkeit von Geometrie, Temperatur und Stromaufnahme noch nicht zu einem Overload am RheCon führt. Der zeitliche Verlauf dieser Vorgabe wird in Bild 60-A dargestellt. Neben den Vorgabeparametern Volumenstrom und Steuerspannung werden weiterhin der Druck vor und nach dem ER-Strömungswiderstand und die Stromstärke gemessen. Der zeitliche Verlauf der Druckdifferenz als Reaktion auf die Veränderung der elektrischen Feldstärke wird in Bild 60-B dargestellt. Dabei wirkt sich der Anstieg der Druckdifferenz auf den als konstant vorgegebenen Volumenstrom aus. Unter Anwendung der unter 4.2.1 aufgeführten Gleichungen werden die Wandschubspannung und die Schergeschwindigkeit ermittelt. Wird nun die Wandschubspannung als Funktion der elektrischen Feldstärke dargestellt, ergibt sich ein Zusammenhang gemäß Bild 60-C.

Auch diese Form der Messung wurde bereits in mehreren vorangegangenen Arbeiten angewandt [Wol1, Fes1, Zau3], wobei dort an Stelle der Wandschubspannung die Druckdifferenz als Funktion der elektrischen Feldstärke dargestellt wurde. Auf dem in Bild 60-C dargestellten Zusammenhang beruht auch der unter 2.3.3 erwähnte mathematische Zusammenhang von KEMMETMÜLLER und KUGI (Gl. (13)).

In Bild 60-A ist erkennbar, dass der gewählte Volumenstrom über die Messdauer nicht konstant gehalten werden kann. Mit der Steuerspannung steigt die Druckdifferenz an, was einen Einbruch des Volumenstroms zur Folge hat. Mit dem Abfall der Steuerspannung steigt der Volumenstrom über den vorgewählten Wert hinaus wieder an. Dieser Verlauf des Volumenstroms ist zum einen durch das PID-Regelverhalten des Proportionalventils bedingt. Weiterhin ist es auf das Fehlen von Druckspeichern zum Ausgleich von Lastspitzen zurück zu führen. Um den Volumenstrom während der Messung konstant zu halten, wären umfangreiche Änderungen am Prüfstandsaufbau und an der Regelung erforderlich gewesen.

Die in diesen Messungen ermittelte Schubspannung ist somit nicht nur eine Funktion der elektrischen Feldstärke, sondern auch der Schergeschwindigkeit. Auffällig ist jedoch, dass trotz unterschiedlicher Schergeschwindigkeiten im ansteigenden und abfallenden Teil der Spannungsrampe gleiche Schubspannungen ermittelt werden. Diese Beobachtung wurde bei allen Messungen bestätigt. Somit ist es nicht möglich, die auf Basis dieser Messungen gewonnenen Schubspannungswerte einer exakten Schergeschwindigkeit zuzuordnen.



Bild 60: Ablauf einer Messung bei Vorgabe einer Spannungsrampe

Auch bei dieser Form einer dynamischen Messung wird zunächst deutlich, dass die ermittelten Druckdifferenzen geometrieabhängig sind. Die geometrieabhängige

Berechnung der Schergeschwindigkeit gemäß GI. (21) und der Wandschubspannung gemäß GI. (22) führt jedoch auch in diesem Fall nicht zu einer Übereinstimmung der Schubspannungswerte zwischen den einzelnen Geometrien (Bild 61). Eine WEISSENBERG/RABINOWITSCH-Korrektur der auf diese Art aufgenommenen Messwerte ist nicht möglich, da diese nicht eindeutig einer Schergeschwindigkeit zugeordnet werden können.



Bild 61: Vergleich des Geometrieeinflusses auf Druckdifferenz und Wandschubspannung als Funktion der Feldstärke

#### 4.3.3 Vorgabe von konstantem Volumenstrom und konstanter Feldstärke

Bei den unter diesem Punkt beschriebenen Messungen handelt es sich um die quasistatische Aufnahme der Wandschubspannung als Funktion der Zeit. Nach Einstellung der Prüftemperatur wird über die Messdauer sowohl ein konstanter Volumenstrom als auch eine konstante Steuerspannung vorgegeben. Der zeitliche Verlauf dieser Vorgabe wird in Bild 62-A dargestellt. Auch hier werden Volumenstrom, Steuerspannung, die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  sowie die Stromstärke gemessen. Wandschubspannung und Schergeschwindigkeit werden wie bekannt ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Druckdifferenz als Reaktion auf den vorgegebenen Volumenstrom wird in Bild 62-B dargestellt.

Anhand des in Bild 62-B dargestellten Volumenstroms ist erkennbar, dass der gewählte Wert über die Messdauer nicht vollkommen konstant gehalten werden konnte. Die geringfügigen Schwankungen sind durch den gesamten Messaufbau bedingt, wobei jedoch das PID-Regelverhalten des Proportionalventils dominiert. Aus der Schwankung des Volumenstroms resultiert somit auch eine ebenfalls geringfügige Schwankung der gemessenen Druckdifferenz. Wird nun die Wandschubspannung als Funktion der Schergeschwindigkeit dargestellt, ergibt sich ein Streubereich der Messwerte gemäß Bild 62-C. Zur Findung der Einzelwerte wurde jeweils ein Bereich ausgewählt, in dem Volumenstrom und Druckdifferenz nahezu konstant waren. Aus diesen Wertepaaren wurde jeweils der Mittelwert für Schergeschwindigkeit und Wandschubspannung berechnet. Die Fließkurve wurde dann aus Einzelwerten zusammengesetzt, welche aus Messungen bei unterschiedlichem Volumenstrom ermittelt wurden.



Bild 62: Ablauf einer Messung bei Vorgabe konstanter Steuerparameter

Die in diesen Messungen ermittelte Schubspannung ist somit nur eine Funktion der Zeit. Weder fließt die Änderung eines Volumenstroms wie unter 4.3.1 noch die Änderung der elektrischen Feldstärke wie unter 4.3.2 in das Ergebnis ein. Trotz Ansteuerung im Zwei-Quadrantenbetrieb können Elektrophorese und diesbezügliche Effekte auf das Zeitverhalten ausgeschlossen werden, da die im Spalt befindliche Probenmenge fortlaufend durch nachströmende Flüssigkeit erneuert wird. Die mit diesem Messverfahren gewonnenen Ergebnisse unterscheiden sich deutlich von denen der bisher angewandten Verfahren. Zwar liegen die Ergebnisse der dynamischen und quasistatischen Messungen bei E = 0 bzw. 1 kV/mm nahe beieinander, bei Feldstärken größer 1 kV/mm werden durch quasistatische Messungen (Bild 63).



Bild 63: Dynamische und quasistatische Messung auf Normspaltprüfstand im Vergleich

Bild 64 zeigt nun den Einfluss der elektrischen Feldstärke auf das Fließverhalten der ERF bei quasistatischer Aufnahme der scheinbaren Fließkurve. Die Messungen zeigen eine gute Wiederholbarkeit. Im Gegensatz zur dynamischen Aufnahme der Fließkurve kann die Fließgrenze jedoch nicht mehr messtechnisch erfasst werden.



Bild 64: Scheinbare Fließkurven für D=29,7mm; L=100 mm; H=1,0 mm

7500

5000

2000

1000

0+

2500

Im weiteren Verlauf ist nun zu klären, inwieweit durch eine Korrektur nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH eine Übereinstimmung der Fließkurven aus unterschiedlichen Geometrien erreicht werden kann. Entsprechend den Ausführungen unter 4.2.2 ist ein geeigneter mathematischer Ansatz zur Approximation der scheinbaren Fließkurve zu finden. Für den Fall E = 0 kV/mm ergibt sich für die Abhängigkeit  $D_S = f(\tau_W)$  ein linearer Zusammenhang. Für Feldstärken größer 0 kV/mm erfolgte entweder eine Approximation mittels polynomialer Funktion (GI. (32)) oder Potenzfunktion (GI. (33)).

$$D_{\rm S} = \mathbf{a} \cdot \tau^3 + \mathbf{b} \cdot \tau^2 + \mathbf{c} \cdot \tau + \mathbf{d} \tag{32}$$

10000

Schergeschwindigkeit [1/s]

12500

15000

17500

$$D_{\rm S} = \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{\tau}^{\,b} \tag{33}$$

Nach Ermittlung des Differenzenquotienten  $dD_S/d\tau_W$  aus der jeweils gefundenen Funktion erfolgt die Berechnung der wahren Schergeschwindigkeit  $D_W$  gemäß Gl. (27). Das Verhältnis zwischen scheinbarer und wahrer Fließkurve wird beispielhaft in Bild 65 gezeigt.



Bild 65: Scheinbare und wahre Fließkurven nach WEISSENBERG-Korrektur für D=29,7 mm; L=100 mm; H=1,0 mm

Betrachtet man nun die wahren Fließkurven im Vergleich unterschiedlicher Geometrien für E = 0 kV/mm ist erkennbar, dass auch mit dieser Korrektur keine vollständige Übereinstimmung der Fließkurven erzielt werden kann (Bild 66). Bei Feldstärken > 0 kV/mm ist nach Durchführung der Korrektur keine Übereinstimmung der Fließkurven festzustellen. Dabei wurden verschiedene Approximation mittels linearer, polynomialer oder Potenzfunktion auf ihre Eignung geprüft. Der Darstellung in Bild 67 liegt eine Approximation mittels Potenzfunktion zu Grunde.

Mit Blick auf die unter Punkt 5.3 getroffenen Aussagen zum Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen ist an dieser Stelle ergänzend anzumerken, dass die verwendete ERF für die unter den Punkten 4.3.3 und 4.4 beschriebenen Untersuchungen zuvor dem Hydraulikprüfstand vollständig entnommen und extern homogenisiert wurde. Die Aufnahme der Messwerte erfolgte über einen Zeitraum von acht Wochen bei regelmäßiger Durchspülung der Anlage. Die Abnahme der Partikelkonzentration durch Sedimentation kann daher vernachlässigt werden.







Bild 67: Wahre Fließkurven nach WEISSENBERG-Korrektur für E=2 kV/mm, H=0,7 mm

#### 4.4 Wandgleiten

### 4.4.1 Grundlegende Betrachtungen auf Basis der bisherigen Erkenntnisse

Da es auch nach Durchführung der WEISSENBERG/RABINOWITSCH-Korrektur nicht zu einer Übereinstimmung der Fließkurven aus verschiedenen Spaltgeometrien gekommen ist, liegt der Schluss nahe, dass die Bedingung der Wandhaftung für das Fließen im homogenen Spalt im vorliegenden Fall nicht erfüllt ist. Zudem ist aus der Literatur bekannt, dass Suspensionen auf Grund ihrer heterogenen Struktur oder Polymerschmelzen mit strukturviskosen Eigenschaften zum Wandgleiten neigen [Pah1, Mer1]. Liegt keine Wandhaftung vor, so ist die Geschwindigkeit an der Wand nicht Null, sondern es kommt zu einer Überlagerung von Scher- und Gleitvorgängen in der Suspension (Bild 68). Das Geschwindigkeitsprofil v(r) setzt sich dabei gemäß Gl. (34) aus der konstanten Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub> und einer überlagerten Geschwindigkeit v\*(r) zusammen, die sich aus der inneren Scherdeformation des Fluids ergibt [Pah1]. Dabei ist die Höhe der Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub> von der Rauhigkeit der Kapillaroberfläche abhängig [Gar1].

$$V(r) = V_G + V^*(r)$$
 (34)



Bild 68: Geschwindigkeitsprofile v(r), a) ohne Wandgleiten, b) mit Wandgleiten [Pah1]

Erstmals veröffentlichte MOONEY [Moo1] ein experimentelles Verfahren für Kapillarviskosimeter und koaxiale Rotationsrheometer mit Zylindergeometrie zur Bestimmung der Wandgleitgeschwindigkeit  $v_G$  in Abhängigkeit der Wandschubspannung  $\tau_W$ . Für die experimentelle Bestimmung werden Kapillaren mit unterschiedlichem Radius R, aber gleichem L/R-Verhältnis benötigt. Als vorteilhafte

Versuchseinrichtung beschreibt PAHL die Doppelkapillare, bei welcher wegen der gleichen Druckdifferenz  $\Delta p$  über beiden Kapillaren jeweils die gleiche Wandschubspannung  $\tau_W$  erzeugt wird [Pah1]. Messungen des Volumenstroms Q bei konstanter Wandschubspannung werden im sogenannten MOONEY-Plot aufgetragen, wobei die Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub> der Steigung tan $\alpha$  der sich ergebenden Geraden entspricht (Bild 69).



Bild 69: MOONEY-Plot zur Bestimmung der Gleitgeschwindigkeit aus Messung des Volumenstroms mit Kreiskapillaren bei konstanter Schubspannung

# 4.4.2 Ansatz zur Ermittlung des Wandgleitens

Wie bereits unter 4.2.1 beschrieben, lässt sich der Ringspalt auch als Rechteckspalt unendlicher Breite abbilden. Wandgleiten findet in diesem Fall an den Mantelflächen von Innen- und Außenzylinder des Ringspaltventils statt. Bei einem realen Flachspalt wäre dagegen auch der Gleitanteil durch die seitliche Begrenzung des Flachspalts zu berücksichtigen. In der Praxis wird dieser Anteil bei kleinen H/B-Werten jedoch oft vernachlässigt.

Das Geschwindigkeitsprofil v(h) der Gleitströmung setzt sich aus der konstanten Gleitgeschwindigkeit  $v_G$  und einer überlagerten Geschwindigkeit v\*(h) zusammen (Gl. (35)):

$$v(h) = v_G + v^*(h)$$
 (35)

87

Demzufolge berechnet sich der Gesamtvolumenstrom Q aus dem Gleitvolumenstrom  $Q_G$  und dem Schervolumenstrom  $Q_S$  entsprechend den nachfolgenden Gleichungen (36) bis (38):

$$Q = Q_G + Q_S \tag{36}$$

$$Q_G = B \cdot H \cdot V_G \tag{37}$$

$$Q_{S} = 2 \cdot B \cdot \int_{0}^{H/2} v^{*}(h) dh$$
(38)

Da die Gleitgeschwindigkeit  $v_G$  keinen Beitrag zur inneren Deformation leistet, muss die innere Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aus dem Gesamtvolumenstrom Q auf Basis der Geschwindigkeitsverteilung v\*(h) bzw. dem Schervolumenstrom Q<sub>S</sub> gemäß Gl. (39) berechnet werden:

$$\dot{\gamma}(h) = -\frac{dv^*(h)}{dh}$$
(39)

Dazu sind der Gleitvolumenstrom  $Q_G$  und der Schervolumenstrom  $Q_S$  voneinander zu trennen. Grundlage für dieses Verfahren bilden die Untersuchungen von MOONEY [Moo1].

$$Q = B \cdot H \cdot v_G + 2 \cdot B \cdot \int_{0}^{H/2} v^*(h) dh$$
(40)

Durch partielle Integration der Gl. (38) ergibt sich:

$$Q_{S} = 2 \cdot B \cdot h \cdot v^{*}(h) \int_{0}^{H/2} -2 \cdot B \cdot \int_{0}^{H/2} \frac{dv^{*}(h)}{dh} h dh$$
<sup>(41)</sup>

Da an der unteren Integrationsgrenze h = 0 ist und an der Wand (h = H/2) definitionsgemäß die Geschwindigkeit v\*(h) = 0 gesetzt wird, ist der erste Term in Gl. (41) gleich null. Unter Anwendung von Gl. (39) folgt:

$$Q_{S} = 0 + 2 \cdot B \cdot \int_{0}^{H/2} \dot{\gamma}(h) \cdot h dh$$
(42)

Das Intergral über die Geschwindigkeitsverteilung lässt sich durch ein Integral über die Fließfunktion substituieren:

$$Q_{\rm S} = 2 \cdot B \cdot \int_{0}^{H/2} \frac{\tau(h)}{\eta[\tau(h)]} \cdot hdh$$
(43)

Weiterhin gelten:

$$\frac{\tau}{\tau_W} = \frac{h}{H/2} \tag{44}$$

$$dh = \frac{H/2}{\tau_W} d\tau \tag{45}$$

$$h(\tau) = \frac{L}{\Delta p} \cdot \tau \tag{46}$$

$$\tau_W = \frac{H}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \tag{22}$$

Daraus folgt:

$$Q_{S} = \frac{B \cdot H^{2}}{2 \cdot \tau_{W}^{2}} \cdot \int_{0}^{\tau_{W}} \frac{\tau^{2}}{\eta(\tau)} \cdot d\tau$$
<sup>(47)</sup>

und

$$\frac{2 \cdot Q}{B \cdot H^2} = \frac{2 \cdot v_G(\tau_W)}{H} + \frac{1}{\tau_W^2} \cdot \int_0^{\tau_W} \frac{\tau^2}{\eta(\tau)} \cdot d\tau$$
(48)

GI. (48) enthält nun zwei von der Wandschubspannung  $\tau_W$  abhängige Summanden, von denen der letzte ein bestimmtes Integral enthält und mit A( $\tau_W$ ) abgekürzt wird. Die GI. (49) wird MOONEY-Gleichung genannt.

$$\left(\frac{2 \cdot Q}{B \cdot H^2}\right)_{\tau_W = konst} = \frac{2 \cdot v_G(\tau_W)}{H} + A(\tau_W)$$
(49)

Messungen des Gesamtvolumenstroms Q bei konstanter Wandschubspannung  $\tau_W$ mit Ringspaltgeometrien unterschiedlicher Höhe H ergeben dann die Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub>, da A( $\tau_W$ ) in Gl. (49) unter dieser Bedingung einen konstanten Wert hat. Die Auftragung von 2 Q / (B H<sup>2</sup>) über 2/H ergibt eine Gerade (Bild 70). A( $\tau_W$ ) ist dann der Ordinatenabschnitt bei 2/H = 0 und die Steigung tan $\alpha$ der Geraden entspricht der Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub>.



#### Bild 70: MOONEY-Plot zur Bestimmung der Gleitgeschwindigkeit aus Messung des Volumenstroms mit Ring- und Flachspaltkapillaren bei konstanter Schubspannung

Für Kapillaren unterschiedlicher Geometrie kann unter der Bedingung  $\tau_W$  = konstant nachfolgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$\frac{2 \cdot v_G}{H_1} - \frac{2 \cdot v_G}{H_2} = \frac{2 \cdot Q_1}{B_1 \cdot {H_1}^2} - \frac{2 \cdot Q_2}{B_2 \cdot {H_2}^2}$$
(50)

Die Gleitgeschwindigkeit v<sub>G</sub> kann entsprechend Gl. (51) ermittelt werden.

$$V_{G} = \frac{\frac{2 \cdot Q_{1}}{B_{1} \cdot H_{1}^{2}} - \frac{2 \cdot Q_{2}}{B_{2} \cdot H_{2}^{2}}}{\frac{2}{H_{1}} - \frac{2}{H_{2}}}$$
(51)

## 4.4.3 Nachweis des Wandgleitens durch eigene Messungen

Entsprechend GI. (49) und Bild 70 werden zum Nachweis des Wandgleitens zwei verschiedene Spalthöhen und die dazugehörigen Gesamtvolumenströme in Abhängigkeit von der Wandschubspannung benötigt. Für die aufgenommenen Fließkurven ist zunächst der Bereich gleicher Schubspannungen zu ermitteln. Um für  $\tau_W$  = konstant den jeweiligen Gesamtvolumenstrom bestimmen zu können, ist weiterhin eine Approximation Q = f( $\tau_W$ ) erforderlich. In Tabelle 11 wird der Wertebereich der Wandschubspannung sowie die gefundene Approximation des Gesamtvolumenstroms für die ausgewählten Geometrien aufgeführt. Der

Volumenstrom als Funktion der Wandschubspannung kann für E = 0 kV/mm über eine lineare und für E = 3 kV/mm über eine Potenzfunktion ermittelt werden.

L	Н	В	E	$\tau_{W}$	$Q = f(\tau_W)$
[mm]	[mm]	[mm]	[kV/mm]	[Pa]	[l/min]
100	0,7	94,25	0	1401026	$Q = 0,0144 \cdot \tau_W - 0,0946$
100	1,0	93,31	0	82583	$Q = 0,0284 \cdot \tau_W - 0,5094$
100	0,7	94,25	3	26883983	$Q = 1,648 \cdot 10^{-15} \cdot \tau_W^{4,418}$
100	1,0	93,31	3	24643619	$Q = 2,879 \cdot 10^{-19} \cdot \tau_W^{5,550}$

Tabelle 11: Volumenstrom als Funktion der Schubspannung

Entsprechend den in Tabelle 11 aufgeführten Funktionen wird der Ausdruck  $2 \text{ Q} / (\text{B H}^2)$  berechnet. Eine Gegenüberstellung von wahrer Fließkurve und MOONEY-Plot erfolgt für E = 0 kV/mm in Bild 71 und für E = 3 kV/mm in Bild 72. Als konstante Wandschubspannungen werden dabei jeweils Werte gewählt, welche innerhalb des Wertebereichs gleicher Schubspannungen liegen.



Bild 71: Gegenüberstellung von wahrer Fließkurve und MOONEY-Plot für E=0 kV/mm



Bild 72: Gegenüberstellung von wahrer Fließkurve und MOONEY-Plot für E=3 kV/mm

Der Gleitanteil v<sub>G</sub> ermittelt sich entweder rechnerisch aus Gl. (51) oder grafisch aus dem Anstieg tan  $\alpha$  der Geraden im MOONEY-Plot. In den ausgewählten Beispielen beträgt die mittlere Gleitgeschwindigkeit für E = 0 kV/mm v<sub>G</sub>  $\approx$  0,23 m/s bei  $\tau_W \approx 400$  Pa und für E = 3 kV/mm v<sub>G</sub>  $\approx$  0,73 m/s bei  $\tau_W \approx 3200$  Pa. Hinsichtlich des Einflusses der Wandschubspannung und der elektrischen Feldstärke auf die Höhe der Gleitgeschwindigkeit konnte keine eindeutige Zuordnung erfolgen.

## 4.5 Ermittlung weiterer charakteristischer Kennwerte im Fließkanal

### 4.5.1 Viskosität

Wie bereits im Abschnitt 4.2.1 dargelegt kann für ER-Suspensionen unter Verwendung von GI. (23) die scheinbare dynamische Viskosität  $\eta_s$  ermittelt werden. In Bild 59 wurde bereits gezeigt, dass die Viskosität stark von der Schergeschwindigkeit abhängig ist.

Da lediglich mit dynamischen Messungen gemäß 4.3.1 Messreihen über einen weiteren Temperaturbereich durchgeführt wurden, muss hier zur Darstellung des

Temperatureinflusses auf den elektrorheologischen Effekt auf diese Messwerte zurück gegriffen werden. Wie bereits unter 4.3.1 dargelegt, erfasst die verwendete Methode auch stark die Systemdynamik. Um diesen Einfluss bei der Auswertung der Messwerte hinsichtlich der Viskosität zumindest einzugrenzen, wurden die Viskositäten bei maximalem und konstantem Volumenstrom ermittelt. Das bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt auch die Druckdifferenz und demzufolge die Wandschubspannung maximale und konstante Werte angenommen hatten (Bild 56-A und -B).

In Bild 73 wird das Verhalten der scheinbaren dynamischen Viskosität als Funktion der Temperatur in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke dargestellt. Dem Diagramm liegen die Messwerte der Geometrie mit den Abmessungen D=40 mm, L=100 mm und H=1,0 mm zu Grunde. Da auch die Stromdichte in Abhängigkeit von elektrischer Feldstärke und Temperatur ansteigt (siehe 4.5.2), war es nicht möglich, den gesamten Temperaturbereich von 25°C bis 60°C bei allen Feldstärken vollständig zu vermessen. Bei Geometrien größerer Länge und kleineren Querschnitts kam es bereits bei Temperaturen > 50°C zu Überlastungen der Hochspannungsquelle.



Bild 73: Scheinbare Viskosität in Abhängigkeit von Temperatur und elektrischer Feldstärke

Die Messwerte in Bild 73 lassen sich quantitativ nicht mit denen aus Bild 37 vergleichen. Die Ursache ist zum einen das verwendete Messverfahren und die dabei erfasste Systemdynamik (vgl. Bild 63). Zum zweiten resultieren aus den hohen Schergeschwindigkeiten > 15.000 s<sup>-1</sup> Viskositäten, welche deutlich unter denen bei 500 bis 1000 s<sup>-1</sup> liegen (vgl. Bild 59). Letztlich wurde das elektrische Feld im Fließkanal durch eine Gleichspannung erzeugt, wogegen bei den Messungen mit dem Rheometer zur Felderzeugung eine Wechselspannung verwendet worden ist. Dabei ist bekannt, dass mit Gleichspannungsfeldern höhere Schubspannungen erzielt werden als mit Wechselfeldern [Abu1].

Qualitativ bestätigt die Darstellung in Bild 73 jedoch die Resultate aus Kapitel 3. Die Viskosität steigt mit der Temperatur und erreicht für die ausgewählte Substanz zwischen 50°C und 60°C ihr Maximum. In einer Einzelmessung der Geometrie mit den Abmessungen D=30 mm, L=200 mm und H=0,7 mm wurde bei 3 kV/mm und 73°C bereits Abfall von 7% gegenüber der Viskosität bei 50°C festgestellt.

### 4.5.2 Bestimmung elektrischer Kennwerte

Wie bereits unter 4.2.1 ausgeführt bezeichnet die Stromdichte gemäß GI. (25) das Verhältnis der Stromstärke zur senkrecht durch den elektrischen Strom durchflossenen Fläche. Die Stromdichte ist weiterhin proportional zur elektrischen Feldstärke entsprechend GI. (52). Der Proportionalitätsfaktor ist dabei die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$ , welche dem Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes  $\rho$  entspricht (GI. (53)).

$$J = \frac{I}{B \cdot L}$$
(25)

$$J = \sigma \cdot E \tag{52}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$
(53)

Unter Anwendung dieser Gleichungen und dem Zusammenhang zwischen Feldstärke E und Spannung U entsprechend Gl. (24) kann somit der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  aus den Messungen im Fließkanal gemäß Gl. (54) bestimmt werden.
$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{B \cdot L}{H}$$
(54)

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Stromdichte außer von der elektrischen Feldstärke auch von der Schergeschwindigkeit (Bild 74) und der Temperatur (Bild 75) abhängig ist. Die Stromdichte fällt mit steigender Schergeschwindigkeit ab, steigt jedoch zusammen mit der Temperatur an.



elektrischer Feldstärke



Die Stromaufnahme ist jedoch auch von der Spaltlänge abhängig. Unter 4.2.3 wurde bereits erwähnt, dass an dem Produkt NMW ERF44 bei einer Temperatur von 40°C und einer Geometrie mit den Abmessungen D = 30 mm, L = 100 mm und H = 0,7 mm noch Messungen bei einer Feldstärke von 4 kV/mm ohne Überlastung der Hochspannungsquelle möglich waren. Dagegen reduzierte sich die maximal einstellbare Feldstärke bei einer Geometrie mit den Abmessungen D = 30 mm, L = 200 mm und H = 0,7 mm bereits auf 2 kV/mm. Bild 76 zeigt den Einfluss der Spaltlänge auf die Stromaufnahme für das Produkt NMW ERF44.

Bei einer Spalthöhe von 0,7 mm und einer Feldstärke von 3 kV/mm beträgt die erforderliche Steuerspannung 2,1 kV. Da die Ausgangsleistung der verwendeten Hochspannungsquelle RheCon maximal 120 W beträgt (siehe Tabelle 9), darf bei einer Steuerspannung von 2,1 kV die Stromaufnahme 57 mA nicht übersteigen. Aufgrund der hohen Stromaufnahme der NMW ERF44 und der hier dargelegten Zusammenhänge ist die Bestimmung möglicher Ein- und Auslaufdruckverluste bei elektrischen Feldstärken > 0 kV/mm unter Verwendung der Sondergeometrie mit der Spaltlänge 300 mm nicht möglich (siehe 4.2.3). Die hohe Stromaufnahme

dieser ERF war auch bei der systematischen Vermessung des Fließverhaltens in Geometrien unterschiedlicher Spaltlänge nachteilig, da vor allem bei Spaltlängen von 200 mm nur Feldstärken bis 2 kV/mm eingestellt werden konnten. Dass diese hohe Stromaufnahme für ERF eher unüblich ist, zeigt der Vergleich von NMW ERF44 mit BAYER Rheobay AI 3566. Wie in Bild 77 zu sehen ist, liegt die Stromaufnahme von Rheobay AI 3566 deutlich unter der von NMW ERF44. Rheobay AI 3566 wurde noch für Voruntersuchungen verwendet, stand jedoch im weiteren Verlauf der Untersuchungen nicht mehr in ausreichender Menge für eine Befüllung des Prüfstandes zur Verfügung. Die entwickelte Methodik konnte somit nicht mehr an Rheobay AI 3566 überprüft werden.



Bild 76: Abhängigkeit der Stromaufnahme von Schergeschwindigkeit und Spaltlänge





### 4.5.3 Ansprechzeit

Bei der unter diesem Punkt aufgeführten Messmethode handelt es sich um die dynamische Aufnahme einer Sprungantwort auf die Vorgabe einer pulsierenden Steuerspannung. Nach Einstellung der Prüftemperatur wird zunächst ein konstanter Volumenstrom vorgegeben. Während der Messung wird die Steuerspannung in Form einer Sprungfunktion von Null auf einen vorgewählten Wert gesteigert und wieder auf Null reduziert. Der zeitliche Verlauf dieser Vorgabe wird in Bild 78-A dargestellt. Bild 78-B zeigt den zeitlichen Verlauf der Druckdifferenz als Reaktion auf die Veränderung der elektrischen Feldstärke. Dabei wirkt sich auch hier der Anstieg der Druckdifferenz auf den als konstant vorgegebenen Volumenstrom dahingehend aus, dass der voreingestellte Volumenstrom nicht konstant gehalten werden kann. Wird nun die Druckdifferenz als Funktion der Zeit in einer größeren Auflösung dargestellt, ergibt sich ein Zusammenhang gemäß Bild 78-C.



Bild 78: Ablauf einer Messung bei Vorgabe einer Sprungfunktion der Steuerspannung

Es wird deutlich, dass die Änderung der Steuerspannung eine schnelle Änderung der Druckdifferenz zur Folge hat. Die aufgrund des spezifischen Prüfstandsaufbaus aus der Änderung der Druckdifferenz resultierende Änderung des als konstant vorgegebenen Volumenstroms beeinflusst das Endergebnis. Da jedoch bekannt ist, dass das dynamische Verhalten von ERF Gegenstand aktueller Untersuchungen am IFAS der RWTH Aachen ist [Zau5], wird an dieser Stelle auf weiterführende Betrachtungen zum Ansprechverhalten verzichtet.

# 5 CHARAKTERISIERUNG WEITERER MATERIALEIGENSCHAFTEN

### 5.1 Elektrophysikalische Charakterisierung

Betrachtet man die Spaltgeometrie als Kondensator, so hängt dessen Kapazität C von der Größe der Platten A, ihrem Abstand H und dem Material zwischen den Platten, dem Dielektrikum, ab (Gl. (55)). Das Material wird dabei durch die Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  beschrieben, welche sich aus der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0$  und der Dielektrizitätszahl  $\varepsilon_r$  berechnet (Gl. (56)). Dabei wird die Feldkonstante  $\varepsilon_0$  mit 8,85 · 10<sup>-12</sup> F/m angegeben [Kch1].

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{H}$$
(55)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \tag{56}$$

Für weiterführende Betrachtungen, so z.B. bei der Auslegung der Ansteuerung der ERF in einer technischen Applikation, ist daher auch die Dielektrizitätskonstante von Bedeutung.

In Anlehnung an DIN EN 60247, Teil 2 [DIN10] wurde an der ERF Rheobay AI 3566 mit einem BAUR DTL die Bestimmung der Dielektrizitätszahl  $\varepsilon_r$ , des dielektrischen Verlustfaktors tan  $\delta$  und des spezifischen elektrischen Durchgangswiderstandes  $\rho$  durchgeführt (Tabelle 12). Bei der Messzelle handelte es sich um eine 3-Elektroden Schutzringzelle, Typ MC 2A. Gemessen wurde bei einer Spannung von 500 V AC, einer elektrischen Feldstärke von 0,25 kV/mm und einer Frequenz von 50 Hz. Der Elektrodenabstand betrug 2,0 mm.

Da die Messwerte für die Dielektrizitätszahl nicht der geforderten Wiederholbarkeit entsprechen, werden in Tabelle 12 jeweils die Einzelwerte aus der Doppelbestimmung aufgeführt. Für den dielektrischen Verlustfaktor und den spezifischen elektrischen Widerstand werden jeweils die Mittelwerte angegeben.

Während der Durchgangswiderstand mit steigender Temperatur sinkt, steigen Dielektrizitätszahl und dielektrischer Verlustfaktor mit der Temperatur. Die Dielektrizitätszahl liegt dabei deutlich über der von Silikonöl, welche ohne Angabe einer Temperatur mit 2,2 bis 2,8 beziffert wird [Kch1].

Messungen bei 75°C waren nicht möglich, da das Messgerät bei Erreichen der Prüftemperatur das Messprogramm abgebrochen hat. Da sich die Reinigung der Messzelle sehr aufwändig gestaltete, wurde eine Vermessung der weiteren Flüssigkeiten nicht durchgeführt.

Temperatur	Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$	dielektrischer Verlustfaktor tan $\delta$	Durchgangs-widerstand $\rho$	
25°C 25°C	6,16 6,49	0,639	1,325 • 10 <sup>9</sup> Ohm m	
50°C 50°C	14,29 15,41	0,998	1,00 • 10 <sup>9</sup> Ohm m	

Tabelle 12: Elektrophysikalische Kennwerte von Rheobay Al 3566

Weiterhin erfolgte die Bestimmung der elektrischen Durchschlagspannung gemäß DIN EN 60156 [DIN11] mit einem BAUR Dieltest DTA 100. Gemessen wurde mit kalottenförmigen Messingelektroden bei einer Frequenz von 50 Hz. Der Elektrodenabstand betrug 2,5 mm. Nach DIN EN 60156 sind zehn aufeinander folgende Einzelmessungen durchzuführen und der Mittelwert der ersten sechs Messungen zu bestimmen. Im Verlauf der Prüfung zeigt sich jedoch mit fortschreitender Einzelmessung ein gravierender Abfall der Werte für die Durchschlagspannung. Nach Abschluss der Messreihen wurde mehrfach ein Zusammenbacken der Polyurethanpartikel zwischen den Elektroden beobachtet (Bild 79). In der Wiederholung wurden daher Einzelmessungen mit Unterbrechungen durchgeführt, in denen die Suspension zwischen den Elektroden durch Rühren wieder homogenisiert wurden. Dabei zeigte sich eine Wiederholbarkeit der Ergebnisse entsprechend den normativen Forderungen.

Bei allen Flüssigkeiten ist ein Abfall der Durchschlagspannung über den Temperaturverlauf festzustellen (Bild 80). Dabei liegt die Durchschlagspannung der beiden mit Lithiumchlorid dotierten Flüssigkeiten (Rheobay AI 3565, NMW ERF 44) unter der Durchschlagspannung von Rheobay AI 3566, welche statt dessen Zinkchlorid enthält.





Bild 79: Pfropfenbildung zwischen Prüfelektroden (Aufnahme bei teilweise entleertem Prüfgefäß)



# 5.2 Bestimmung der Dichte

Die Dichte einer ER-Suspension ist hauptsächlich von der Dichte des Grundöles, der Dichte der PUR-Partikel und deren Massengehalt in der Suspension abhängig. Außerdem verändert sich die Dichte mit der Temperatur, da sich Substanzen bei steigender Temperatur ausdehnen, deren Masse jedoch konstant bleibt.

Zur Dichtebestimmung der ERF wurde ein ANTON PAAR Stabinger Viskosimeter SVM 3000 verwendet [Sta1, Sta2]. Dieses Viskosimeter ermöglicht die gleichzeitige Messung der dynamischen Viskosität im Messbereich von 0,2 bis 10.000 mPa s und der Dichte im Messbereich von 0,65 g/cm<sup>3</sup> bis 2,0 g/cm<sup>3</sup> sowie die Berechnung der daraus resultierenden kinematischen Viskosität bei Temperaturen bis maximal +100°C.

Für die Produkte Rheobay Al 3565 und Rheobay Al 3566 wurden Basisviskosität und Dichte mittels SVM 3000 im jeweils für das Produkt empfohlenen Temperatureinsatzbereich bestimmt. Zusätzlich wurden beide Rheobay-Produkte zentrifugiert, um die Partikel vom Grundöl zu separieren. Vom Grundöl beider Proben wurden ebenfalls Viskosität und Dichte bestimmt. Die Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Partikelgehalt ist in Bild 81 grafisch dargestellt. Obwohl beide Produkte auf dem gleichen Grundöl beruhen, weist Rheobay Al 3566 bedingt durch den höheren Partikelgehalt auch eine höhere Dichte als Rheobay Al 3565 auf.

Aus den in Bild 81 dargestellten Messwerten kann der Volumenausdehnungskoeffizient  $\gamma$  ermittelt werden. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte ergibt sich aus Gl. (57).

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma \cdot \Delta \mathcal{G}} \tag{57}$$

Auch die Basisviskosität der einzelnen ER-Suspensionen steigt mit dem Partikelgehalt der ERF (Bild 82). Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Partikelgehaltes wird unter 5.3 näher erläutert. Bedingt durch die Skalierung der Achsen liegen die Einzelviskositäten der drei ER-Suspensionen auf jeweils einer V-T-Geraden. Dieses Verhalten wird auch durch die Messwerte in Kapitel 3.2.1, Bild 30 bestätigt, solange die ER-Suspensionen keinem elektrischen Feld ausgesetzt sind. Da das Grundöl Baysilone über den gemessenen Temperaturbereich eine geringe Basisviskosität < 10 mPa s und einen geringen Viskositätsindex aufweist, liegen auch hier die Messwerte nahezu auf einer Geraden.



Bild 81: Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Partikelgehalt

Bild 82: Abhängigkeit der Basisviskosität von Temperatur und Partikelgehalt

An den separierten Partikeln wurden Dichtemessungen mittels Pyknometer durchgeführt. Das Messprinzip beruht auf der Verdrängung der im Pyknometer befindlichen Flüssigkeit durch die eingebrachten Partikel. Ein leeres Pyknometer mit der Masse m<sub>0</sub> wird zunächst mit einem definierten Volumen Ethanol gefüllt und dessen Masse m<sub>1</sub> erneut bestimmt. In Folge wird die Masse m<sub>2</sub> des mit Partikeln gefüllten Pyknometers bestimmt. Abschließend wird das Pyknometer mit Ethanol auf das definierte Volumen aufgefüllt, um die Masse  $m_3$  zu bestimmen. Aus der bekannten Dichte  $\rho_{\text{Ethanol}}$  des Ethanol und den ermittelten Massen  $m_0$  bis  $m_3$  ergibt sich die Dichte  $\rho_{\text{Partikel}}$  der Partikel gemäß GI. (58).

$$\rho_{Partikel} = \frac{(m_2 - m_0)}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_{Ethanol}$$
(58)

Die Dichte der Polyetherurethanpartikel wurde mit 1162 kg/m<sup>3</sup> bei einer Temperatur von 23,5°C bestimmt.

### 5.3 Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen

Um eine Sedimentation bei ER-Suspensionen zu verhindern, wird nach Möglichkeit ein geringer Dichteunterschied zwischen disperser Phase und Dispergenten angestrebt. Die Suspension bleibt unter diesen Bedingungen somit auch bei längeren Stillstandszeiten relativ absetzstabil.

Begünstigt wird die Sedimentationsstabilität aber auch durch kleine Partikelgrößen, hohe Feststoffvolumengehalte und hohe Dispersionsmittelviskositäten [Zau3].

Mathematische Ansätze zur Stabilität von Suspensionen bzw. zur Sinkgeschwindigkeit von Kugeln sind in verschiedenen Quellen zu finden. Nach ODENBACH [Odb1] berechnet sich die maximal erlaubte Partikelgröße für sedimentationsstabile Suspensionen aus Gl. (59) wie folgt:

$$d_{Part} \le \sqrt[3]{\frac{6 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot \Delta \rho \cdot g \cdot h}}$$
(59)

Dieser Ansatz geht davon aus, dass die potentielle Energie des Partikels  $E_{grav} = \Delta \rho \ g \ h \ \pi \ d^3 \ / 6$  größer sein muss als seine thermische Energie kT. Es ist zu erkennen, dass die Partikelgröße neben dem Dichteunterschied zwischen Partikel und Trägerflüssigkeit auch von der Temperatur abhängig ist, welcher die ERF ausgesetzt wird. Bei einer Dichte der Trägerflüssigkeit von 914 kg/m<sup>3</sup> bei 25°C, einer Dichte der Partikel von 1162 kg/m<sup>3</sup> sowie einer angenommenen Probenhöhe h von 0,1 m ergibt sich eine maximale Partikelgröße d<sub>Part</sub> von 0,032 µm. In der Praxis liegt die Partikelgröße jedoch deutlich über diesem Wert.

Die Sinkgeschwindigkeit im stokesschen Bereich  $w_{Stokes}$  für einen sphärischen Partikel mit Durchmesser  $d_{Part}$  errechnet sich gemäß GI. (60) [Hap1]. Obwohl auch die Dichte temperaturabhängig ist, ist zu erkennen, dass bei sinkender Viskosität  $\eta$  die Sinkgeschwindigkeit zunimmt (Bild 83).

$$w_{Stokes} = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_{Partikel} - \rho_{Grund\"ol}}{\eta} \cdot g \cdot d_{Part}^2$$
(60)



Bild 83: Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit von Partikelgröße und Temperatur

Bei den in Kanistern oder Probengläsern gelagerten ER-Suspensionen konnte bereits nach zwei Wochen eine beginnende Sedimentation festgestellt werden. Aufgrund des guten Redispergiervermögens ließen sich die unterschiedlich stark sedimentierten Suspensionen im Labor mit Hilfe von Rütteltischen und Rotationsmischern jedoch in relativ kurzer Zeit immer wieder vollständig homogenisieren.

Nach DÖRFLER [Drf1] kann die Sedimentationsgeschwindigkeit von Suspensionen mit Hilfe folgender Methoden experimentell ermittelt werden:

- durch Bestimmung der abgesetzten Menge im Gesamtvolumen,

- durch Bestimmung der noch nicht abgesetzten Menge in einem Teilvolumen,
- durch Konzentrationsbestimmung an einer definierten Stelle im Schlämmzylinder.

Zur Bestimmung des Sedimentationsverhaltens wurden die ER-Suspensionen Rheobay AI 3565 und Rheobay AI 3566 homogenisiert und in verschließbare Probengläser gefüllt. Es erfolgte eine Probenahme bei etwa zwei Drittel des Füllstandes gemäß den in Bild 84 angegebenen Intervallen. Anschließend wurde der Partikelgehalt der jeweiligen Proben mittels Gravimetrie bestimmt. Die ERF wurden dazu mit N-Heptan gespült, filtriert und anschließend 30 Minuten bei 80°C getrocknet. Nach ca. acht Wochen wurde die Probenahme beendet, da sich die Suspensionen weitgehend entmischt hatten.

Im Ausgangsstadium zeigten die zwei untersuchten Suspensionen bereits unterschiedliche Partikelkonzentrationen. Diese unterschiedliche Partikelkonzentration wird auch durch die unterschiedlichen Basisviskositäten belegt (siehe 5.1, Bild 81). Während der Partikelgehalt bei Rheobay AI 3566 über vier Wochen nur einen moderaten Abfall zeigte, war bei Rheobay AI 3565 bereits nach zwei Wochen ein drastischer Abfall der Partikelkonzentration zu verzeichnen. Nach ca. acht Wochen konnte jedoch bei beiden Suspensionen ein deutliche Entmischung festgestellt werden. Das Sediment hatte sich zudem fest am Boden abgesetzt.

In nachfolgenden Untersuchungen sollte daher in diesem Zusammenhang auch die Festigkeit des Sediments bestimmt werden, um zukünftig das Sedimentationsverhalten besser charakterisieren zu können. Vorstellbar ist dazu die Messung der Ruhe- und / oder Walkpenetration, wie sie bei Fetten Anwendung findet.

Aus der Erfahrung der eigenen Untersuchungen erscheint weiterhin die Anwendung einer Sedimentationswaage nach ODEN [DIN7] geeignet, um die Sedimentationsgeschwindigkeit zu bestimmen. Dabei wird die Gewichtszunahme des Sediments am Boden eines Becherglases als Funktion der Zeit mittels einer Waagschale ermittelt, welche mit einer Elektrowaage verbunden ist [Drf1].

Während den in Bild 84 dargestellten Werten die Sedimentation einer ERF im Ruhezustand zu Grunde liegt, wird nachfolgend die Sedimentation von Rheobay AI 3566 im Tank des Normspaltprüfstandes dargestellt (Bild 85). Über einen Zeitraum von 620 Tagen, an welchen sich die ERF im Prüfstand befand, wurden sporadisch Proben gezogen, um den Partikelgehalt der sich im Kreislauf befindlichen ERF zu ermitteln. Aus der Darstellung geht hervor, dass auch durch ständiges Umpumpen der ERF im System sowie andere konstruktive Maßnahmen eine Sedimentation im Tank nicht verhindert werden konnte.

Problematisch erscheint in diesem Zusammenhang daher immer noch die Verwendung dieser Flüssigkeiten in Hydraulikanlagen. Auf die Ausführung des Tanks, die Anordnung von Pumpe und Rücklaufleitung sowie weitere Maßnahmen zur Gewährleistung der Durchmischung nach Stillstandszeiten ist daher besonderes Augenmerk zu legen.



Bild 84: Partikelgehalt und Sedimentation von ER-Suspensionen im Probenglas



Bild 85: Sedimentation im Tank des Normspaltprüfstandes

# 5.4 Analytische Charakterisierung

5.4.1 IR-Spektroskopie und begleitende Untersuchungen

# ER-Suspensionen

Ein Teil der nachfolgenden bis zu Punkt 5.4.7 beschriebenen Sachverhalte wurden bereits in [Sdr4] veröffentlicht.

ER-Suspensionen bestehen aus polarisierbaren Feststoffteilchen mit einer vergleichsweise hohen Dielektrizitätszahl, die in einem Trägermedium mit geringer elektrischer Leitfähigkeit und niedriger Dielektrizitätszahl dispergiert sind. Typische

Trägermedien sind beispielsweise leichte Öle, Di-Ether, Paraffine, aromatische Kohlenwasserstoffe oder Silikonöle. Als Feststoffteilchen kommen unter anderem Metalloxide, Kieselsäure-Anhydride oder Polymere mit in ihnen gelösten Metallionen zur Anwendung.

Die infrarotspektroskopischen Untersuchungen wurden auf einem Infrarotspektrometer IFS 28 der Firma BROKER durchgeführt. Die Analyse der Produkte Rheobay AI 3565 und AI 3566 hat ergeben, dass es sich bei beiden Produkten um Suspensionen auf der Basis von Silikonöl (Polydimethylsiloxan) mit Partikeln aus Polyetherurethan handelt. Lithium- bzw. Zinkchlorid konnte infrarotspektroskopisch nicht nachgewiesen werden.

Von den beiden Produkten Rheobay AI 3565 und Rheobay AI 3566 wurden weiterhin Proben von PUR-Partikeln entnommen (Bild 86). Die ERF wurden dazu mit N-Heptan gespült, filtriert und anschließend 30 min bei 80°C getrocknet.



Bild 86: Polyetherurethanpartikel aus einer ERF

Die infrarotspektroskopische Untersuchung der PUR-Partikel aus den verschiedenen ER-Suspensionen ergab keine Unterschiede. Das Verhältnis der

Intensitäten der Banden bei 1530 cm<sup>-1</sup> (charakteristisch für Urethaneinheit) und ca. 1100 cm<sup>-1</sup> (charakteristisch für Ethereinheit) unterscheidet sich zwischen den Proben nicht signifikant (Bild 87):

 $I_{1530 \text{ cm}^{-1}} / I_{1100 \text{ cm}^{-1}} = 0.1515$  für Rheobay AI 3565  $I_{1530 \text{ cm}^{-1}} / I_{1100 \text{ cm}^{-1}} = 0.1399$  für Rheobay AI 3566



Bild 87: Infrarotspektren (ATR) des Filterrückstandes der ERF Rheobay AI 3565 (A) und Rheobay AI 3566 (B) [Sdr4]

# Homogene ERF

Über homogene ERF ist hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Wirkungsweise wenig bekannt. Nach [Swz1] bestehen sie aus einer Metallseife, einem konventionellen Hydrauliköl als Basisflüssigkeit und Hydrauliköl-Additiven. Bei der Metallseife soll es sich um eine komplexe Aluminiumseife auf der Basis von Umsetzungsaddukten von Olefincarbonsäuren mit Aluminiumalkoholaten handeln.

Das Produkt EPS 3301 wurde einer Dialyse unterzogen. Bei dem Dialysat in Höhe von 91,7 %MA handelt es sich um ein Gemisch aus organischen Säuren und Estern. Der Dialyserückstand in Höhe von 8,3 %MA besteht aus Polymeren einer organischen Säure (evtl. Methacrylsäure), welche teilweise in Salzform vorliegen.

Das Dialysat wurde nachfolgend einer gaschromatographischen Untersuchung unterzogen. Hauptbestandteil ist eine eng geschnittene, naphthenbasische Mineralölfraktion. Der Siedebereich dieser Mineralölfraktion entspricht etwa dem des Grundöles eines Hydrauliköles mit NATO-Code H-540. Bei H-540 handelt es sich um ein Hydrauliköl HLP, welches zwischen den ISO-Viskositätsklassen ISO VG 32 und 46 liegt.

Der Dialyserückstand wurde einer REM-EDX-Untersuchung unterzogen. Neben den Elementen Kohlenstoff und Sauerstoff, aus welchen sich das Polymer zusammensetzt, wurde noch Aluminium gefunden. Möglicherweise ist der Einsatz eines mehrwertigen Kations (AI) für die elektrorheologischen Eigenschaften verantwortlich.

Bedingt durch ihren Aufbau treten bei homogenen ERF die für ER-Suspensionen typischen Probleme wie Elektrophorese, Agglomeration und Sedimentation nicht auf.

# 5.4.2 Atomabsorptionsspektroskopie

Die Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) ist eine gebräuchliche Methode zur quantitativen Analyse vieler Elemente in meist wässrigen Lösungen. Die aus den unter 5.1 beschriebenen Untersuchungen stammenden Filter mit Ablagerungen von PUR-Partikeln wurden mittels AAS in der Luft-Acetylen-Flamme auf den Gehalt an Zink bzw. Lithium untersucht. Dazu wurde die Ablagerung einschließlich Filter mit HNO<sub>3</sub> aufgeschlossen, aliquotiert und anschließend nach DIN 38406-08 [DIN3] die Gehalte an Zn und Li bestimmt (Tabelle 13). Somit konnten die für den elektrorheologischen Effekt von ER-Suspensionen wichtigen Elemente nachgewiesen werden.

### Tabelle 13: Analyse von Filtraten auf Zink und Lithium

Produkt	Einwaage	Ermitteltes	Messwert der	Anteil Li
	Polyurethanpartikel	Element	Ablagerung	bzw. Zn
	[9]		[mg/Filter]	[mg/kg]
Rheobay AI 3565	0,2566	Lithium	0,055	214
Rheobay Al 3566	0,3132	Zink	0,125	399

# 5.4.3 Thermische Analyse zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur von Polyetherurethanpartikeln

Zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur Tg wurden die Polyetherurethanpartikel der beiden Produkte Rheobay AI 3565 und Rheobay AI 3566 einer thermischen Analyse mittels dynamischer Differenzkalorimetrie auf einem DSC Q1000 der Firma TA Instruments entsprechend DIN 53765 [DIN4] unterzogen.

Rheobay AI 3565	Tg = -19,7°C
Rheobay AI 3566	Tg = -20,6°C

Die Partikel in den beiden Produkten unterscheiden sich hinsichtlich der Glasübergangstemperatur nicht signifikant.

# 5.4.4 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Filterrückstände von zwei untersuchten ER-Suspensionen wurden weiterhin einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) unterzogen.

Mit der durchgeführten Untersuchung mittels RFA sind alle chemischen Elemente ab Ordnungszahl 11 im Periodensystem (= Natrium) nachweisbar. Die Elemente Lithium, Kohlenstoff und Sauerstoff sind mit dieser Analysemethode also nicht nachweisbar. Es ist daher mit diesem Verfahren nur eine grobe Quantifizierung möglich.

Die mittels RFA quantifizierten Elemente und deren angenäherte Konzentrationen in den Filterrückständen der untersuchten elektrorheologischen Flüssigkeiten sind in Tabelle 14 aufgeführt. Es konnten keine weiteren Elemente nachgewiesen werden. Elemente, die rechnerisch eine Konzentration unterhalb von 20 ppm (=0.002 %) aufweisen, werden nicht aufgeführt (n.n. = nicht nachweisbar).

	Silizium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Zink
Rheobay AI 3565	~ 0.1 %	~ 0.003 %	~ 0.003 %	~ 0.06 %	~ 0.003 %
Rheobay AI 3566	~ 0.5 %	n.n	n.n.	~ 0.02 %	~ 0.02 %

5.4.5 Spektroskopie im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich

Die UV/VIS-Spektroskopie ist eine Spektroskopie, die elektromagnetische Wellen des ultravioletten (UV) und sichtbaren (VIS) Lichts nutzt. Die Spektren der Filterrückstände aus Rheobay AI 3565 und Rheobay AI 3566 zeigen lediglich einen Unterschied hinsichtlich der Absorptionsintensität, nicht jedoch hinsichtlich der Wellenlänge des absorbierten Lichts (Bild 88). Da keine Signalverschiebungen auftreten, können Unterschiede hinsichtlich elektrischer Eigenschaften der Partikel anhand der UV/VIS-Spektren nicht nachgewiesen werden.



Bild 88: Spektren des Filterrückstandes der ERF Rheobay Al 3565 (A) und Rheobay Al 3566 (B) [Sdr4]

5.4.6 Bisheriger Wissensstand zur Polarisierung von ER-Suspensionen

Wie unter 2.5 erwähnt, enthalten die untersuchten ER-Suspensionen Lithiumbzw. Zinkchlorid. Nach der Vernetzung der Polyurethanmatrix liegen diese Salze in Form einer Festkörperlösung (Solid Solution) vor. Dabei wird das vergleichsweise kleine Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ion durch freie Elektronenpaare, die sich an den Sauerstoffatomen der Polyethylenoxidgruppen befinden, koordinativ gebunden. Nach BLOODWORTH [Blo1, Blo2] werden entsprechende Polyethylenoxidkomponenten bzw. Polyethylenglykolether als Ausgangsstoffe für die Polyurethanherstellung eingesetzt. Mit Hilfe von Diisocyanaten erfolgt die Vernetzung. Bild 89 zeigt die beispielhafte Darstellung eines trimethylopropanbasierten Polyetherurethans, das mit Phenyldiisocyanat vernetzt ist. Die für die koordinativ gebundenen Li<sup>+</sup> - bzw. Zn<sup>2+</sup> -Ionen zur Verfügung stehenden Sauerstoffatome sind mit Pfeilen markiert.

Dabei nehmen die Menge an zugesetztem Diisocyanat bzw. die Kettenlänge der Polyethylenglykolether entscheidenden Einfluss auf die Struktur bzw. Eigenschaften der gebildeten Polyurethanmatrix. Vor allem der Vernetzungsgrad, der das Volumen von Hohlräumen im Polyurethannetzwerk (freies Volumen) bestimmt, beeinflusst die sich ableitenden elektrorheologischen Eigenschaften. Während die Polyether (= Polyethylenglykol)-Komponenten für die Lösung und Bindung der Ladungsträger (= Li<sup>+</sup> bzw. Zn<sup>2+</sup>) bzw. insbesondere bei niedrigen Vernetzungsgraden und damit einer niedrigen Glasübergangstemperatur für die Polarisierbarkeit und die Ionenmobilität bzw. Leitfähigkeit verantwortlich sind, führt die zunehmende Vernetzung von Polyurethaneinheiten zu einer zunehmenden strukturellen Integrität bzw. Temperaturstabilität der ERF.

$$R - O\left[CH_2 - CH_2 - \overline{O}\right]CH_2 - CH_2 - OH + OCN - R - NCO \longrightarrow$$

Polyethylenglykolether

Diisocyanat



Bild 89: Beispielhafte Darstellung eines trimethylopropanbasierten Polyetherurethans, das mit Phenyldiisocyanat vernetzt ist [Sdr4]

Die Einsatztemperatur für eine ERF bzw. die Temperatur, bei der günstige elektrorheologische Eigenschaften zu erwarten sind, kann durch die gewählte Zusammensetzung der Ausgangskomponenten für die Polyurethanvernetzung gesteuert werden. Während eine Zugabe von vergleichsweise wenig Diisocyanatkomponenten zur Ausbildung eines vergleichsweise losen Netzwerkes mit großen Hohlräumen bzw. freiem Volumen führt, bewirkt die Zugabe eines hohen Anteils von Diisocyanat die Bildung eines dichten Netzwerks mit kleinen Hohlräumen. Soll der ER-Effekt bereits bei vergleichsweise tiefen Temperaturen einsetzen, so sind die Bedingungen eines großen freien Volumens für die Polarisierung im elektrischen Feld zu bevorzugen (vgl. unten).

Neben dieser Steuerung der elektrorheologischen Eigenschaften aufgrund der Zusammensetzung des Polyurethanmaterials weist der Einfluss einer Temperaturerhöhung vergleichbare Zusammenhänge auf.

Eine Zusammensetzung des Polymermaterials, die große Hohlräume ermöglicht, erlaubt eine weiträumige Delokalisation der Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ionen im koordinativen Verband mit den Sauerstoffatomen der Polyethereinheiten. Dies entspricht einer guten Polarisierbarkeit. Eine Vergrößerung des freien Volumens des Polymernetzwerks aufgrund einer Temperaturerhöhung führt aufgrund des gleichen Phänomens zu einer verbesserten Polarisierbarkeit.

Grundsätzlich ermöglicht eine vergleichsweise hohe Konzentration von Li<sup>+</sup>bzw. Zn<sup>2+</sup>-lonen eine stärkere Polarisierung. Die Gegenwart von sehr vielen Li<sup>+</sup>bzw. Zn<sup>2+</sup>-lonen führt jedoch nicht zu einer unbegrenzt ansteigenden Polarisierbarkeit. Vielmehr wird eine Sättigung der Polarisierbarkeit erreicht, während die Ionenleitfähigkeit stetig zunimmt. Phänomenologisch betrachtet können damit nicht mehr alle Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ionen im Rahmen ihrer koordinativen Bindung polarisiert werden. Der Überschuss an Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ionen wird durch das Anlegen eines elektrischen Feldes aus einer eventuell vorliegenden koordinativen Bindung entfernt und wandert im Polymernetzwerk, was eine Ionenleitfähigkeit bewirkt.

Eine Temperaturerhöhung über ein bestimmtes Maß hinaus bewirkt ebenfalls eine zunehmende Ionenleitfähigkeit auf Kosten der Polarisierbarkeit, was eine Verschlechterung des ER-Effektes nach sich zieht. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass die Vergrößerung des freien Volumens in Form einer zunehmenden Entknäuelung der Polymerstruktur aufgrund der Temperaturerhöhung ebenfalls zu einer bevorzugten Entfernung des koordinativ gebundenen Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ions führt und bei Anlegen des elektrischen Feldes zur Ionenleitfähigkeit beiträgt.

Unterstützt werden diese Annahmen durch den temperaturabhängigen Verlauf der Scherspannung und der Leitfähigkeit von ER-Fluiden. Die Leitfähigkeit steigt erst nach Erreichen der maximalen Schubspannung bei zunehmender Temperaturerhöhung an. Damit sind der Verbesserung der elektrorheologischen Eigenschaften von ERF durch eine Temperaturerhöhung Grenzen gesetzt.

Die Koordination der Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ionen in den Polymerhohlräumen und die darin mögliche Polarisierbarkeit erlauben es, eine ERF zu gewinnen, welche ohne die Hilfeleistung einer polaren Flüssigkeit wie Wasser auskommt, wie es bei den ersten ER-Suspensionen auf Basis von Kieselgelen der Fall war.

### 5.4.7 Interpretation der Ergebnisse aus der analytischen Charakterisierung

Die Behauptung [Blo1, Blo2], dass die Einsatztemperatur einer ER-Suspension durch die Polyetherurethanmatrix bzw. deren Vernetzungsgrad gesteuert wird, kann anhand der erhaltenen Daten nicht nachvollzogen werden.

Die Steuerung des Vernetzungsgrades anhand einer unterschiedlichen Diisocyanat im Konzentration an müsste sich IR-Spektrum anhand unterschiedlicher Intensitäten der charakteristischen Banden (Urethan-Bande / Etherbande) nachweisen lassen. Es können jedoch keine unterschiedlichen Bandenverhältnisse (vgl. 5.4.1) für die untersuchten Proben gefunden werden.

Das Ergebnis wird durch die Bestimmung der Glasübergangstemperatur untermauert (vgl. 5.4.3). Auch hier ist kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Vernetzungsgrades zwischen den untersuchten Proben feststellbar. Die unterschiedlichen Einsatztemperaturen können damit nicht auf die Eigenschaften des Polymernetzwerks der Polyetherurethanmatrix zurückgeführt werden, da diese in beiden Fällen identisch ist.

113

Entscheidenden Einfluss muss aus diesem Grund das für die Polarisierung verantwortliche Kation (Li<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup>) nehmen.

Als theoretisches Modell der unterschiedlichen Polarisierbarkeit der Komplexe ist das "Konzept der harten und weichen Lewis-Säuren und Basen (HSAB)"<sup>2</sup> heranzuziehen. Demnach bilden weiche Säuren<sup>3</sup> stabilere Komplexe mit weichen Basen<sup>4</sup>.

Da im vorliegenden Fall jeweils die gleiche Base für die Komplexbildung vorliegt (Sauerstoff im Polyether ist als harte Base anzusehen) ergeben sich die Unterschiede aufgrund der Eigenschaften der Kationen. Zn<sup>2+</sup> ist als weiches Kation anzusehen (vergleichsweise hoher lonenradius: 0.74 Å. keine abgeschlossene Edelgaskonfiguration der Valenzelektronen, sondern freie Valenzelektronen (10 äußere d-Elektronen)). Li<sup>+</sup> ist als hartes Kation anzusehen (vergleichsweise niedriger Ionenradius: 0.68 Å. abgeschlossene Edelgaskonfiguration der Valenzelektronen, keine freien Valenzelektronen).

Der Zink-Komplex ist somit weniger stabil als der Lithium-Komplex. Die Stabilität dieses Komplexes sollte für das grundsätzliche Eintreten eines ER-Effektes verantwortlich sein. Erst durch die Koordination an die feste Matrix des Polyetherurethans kann die Wechselwirkung mit einem angelegten elektrischen Feld eine Orientierung und damit eine gerichtete Polarisation erfahren.

Einen gravierenden Einfluss auf die elektrorheologischen Eigenschaften sollte die Ionengröße in Bezug auf eine mögliche Delokalisation nehmen. Je kleiner das Kation, umso besser kann eine Delokalisation erfolgen und umso besser sollte die Polarisierung sein.

Diese Effekte sind als Gründe dafür anzusehen, dass die lithiumhaltige ER-Suspension bereits bei niedrigeren Temperaturen einen vergleichbar hohen ER-Effekt zeigt. Die Zunahme des ER-Effektes mit zunehmender Temperatur ist nach wie vor auf die Eigenschaften der Polymermatrix zurückzuführen. Unterschiede

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> HSAB-Prinzip: Principle of Hard and Soft Acids and Bases nach Pearson 1963

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Lewissäure: Elektronenakzeptor; weich: größere räumliche Ausdehnung des Kations, d.h. größerer Ionenradius, weniger starke Bindung der Elektronen, leichter polarisierbar als harte Säuren

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Lewisbase: Elektronendonator

hinsichtlich elektronischer Eigenschaften können anhand der UV/VIS-Spektren nicht nachgewiesen werden, da keine Signalverschiebungen auftreten.

Bild 90 zeigt schematisch die Vorgänge in einem Polyurethanpartikel, welche bei Einfluss eines elektrischen Feldes zur Polarisierung desselben führen. Im Partikel weisen die Polyurethanmoleküle auf molekularer Ebene eine Spaghettistruktur auf. Die Vernetzung der Polyethereinheiten erfolgt dabei über die Urethanbindungen. In den Polymerhohlräumen der Struktur sind die Li<sup>+</sup>bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ionen angeordnet. Diese bilden bei entsprechenden Temperaturen koordinative Bindungen mit den freien Elektronenpaaren der Sauerstoffatome der Polyethylenoxidgruppen (siehe auch Bild 89). Wird nun ein elektrisches Feld angelegt, erfolgt dadurch die Auslenkung des Li<sup>+</sup>- bzw. Zn<sup>2+</sup>-Ions. Damit wird ein Dipolmoment induziert, welches die Ausrichtung der Partikel im elektrischen Feld zur Folge hat.



Bild 90: Modell der Vorgänge bei der Polarisation von Polyurethanpartikeln im elektrischen Feld [Sdr4]

### 5.5 Verträglichkeit mit anderen Stoffen

Gemäß den Herstellerangaben orientiert sich die Elastomerverträglichkeit gegenüber Bayer Rheobay Produkten am Grundöl Baysilone. Verwendete Dichtungsmaterialien müssen demzufolge gegenüber Silikonölen quellbeständig sein. Gleiches gilt auch für Kunststoffe, welche für Isolierungszwecke eingesetzt werden.

Elastomerverträglichkeit und Dichtungsverhalten wurden bereits von WOLFF-JESSE [Wol1] umfangreich untersucht. An insgesamt fünf Werkstoffen wurden in Anlehnung an DIN 53521 [DIN5], welche zwischenzeitlich durch DIN ISO 1817 [DIN6] ersetzt wurde, Quellversuche durchgeführt. Dabei wurden Durchmesser-, Massen-, Volumen- und Längenänderung ermittelt. NBR-Werkstoffe zeigten hinsichtlich dieser Kennwerte ein unbefriedigendes Verhalten. Ein gutes Verhalten zeigten die untersuchten FKM-, PTFE- und PUR-Werkstoffe, wobei sich bei den beiden letztgenannten vergleichsweise geringe Volumen- und Massenänderungen feststellen ließen [Wol1]. Eigene Untersuchungen zur Elastomerverträglichkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

ERF auf Basis von Silikonölen sind generell miteinander mischbar. Wie bereits unter 3.2.2 gezeigt, kann sich dabei jedoch die Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit ändern. Hydraulikanlagen, in welchen silikonölbasische ERF eingesetzt werden, können für Reinigungszwecke mit reinem Silikonöl gespült werden. Unverträglichkeit besteht jedoch zwischen silikonölbasischen ERF und einem demulgierenden Mineralöl mit NATO-Code H-540. Durch das in H-540 enthaltene Zinkdithiophosphat kommt es zu Ausfällungen bei der Mischung beider Produkte.

# 5.6 Beobachtungen aus dem Gebrauch von ERF

Die Alterungsstabilität von ERF wurde von WOLFF-JESSE im Dauerversuch untersucht. Dabei zeigte sich kein signifikanter Einfluss der Versuchsdauer auf die erreichbare Druckdifferenz. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Stromaufnahme mit der Belastungsdauer ansteigt. Chemische Untersuchungen haben ergeben, dass sich in der ERF über die Einsatzdauer geringe Spuren von Metallionen angereichert hatten. Außerdem hatte sich der Wassergehalt in der Flüssigkeit durch Kondenswasserbildung aus der Umgebungsluft erhöht [Wol1]. Eigene Untersuchungen zur Alterungsstabilität wurden nicht durchgeführt. Weiterführend sollen an dieser Stelle jedoch eigene Beobachtungen aus dem Gebrauch von ERF dargelegt werden.

Bedingt durch die hohen Schergeschwindigkeiten im ER-Spalt, aber auch durch den Einsatz einer Innenzahnradpumpe als Fördermittel sind die Partikel in der ERF einer hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Bei Wartungsarbeiten wurde unter diesem Gesichtpunkt im Tank enthaltenes Sediment entnommen. Zunächst zeigte sich, dass es zwischen den Partikeln zu Agglomeration gekommen war. Bei weiterer Betrachtung wurden größere Partikel gefunden, welche durch mechanische Beanspruchung aufgebrochen waren (Bild 91). Diese Partikel sind innen hohl und können im zerbrochenen Zustand kleinere Partikel aufsammeln (Bild 92). Da die Partikel im Verfahren der Suspensionspolymerisation gewonnen werden, wird vermutet, dass die größeren Partikel während der Herstellung nicht vollständig ausgehärtet waren und im nicht zerbrochenen Zustand noch flüssiges Urethan oder andere flüssige Ausgangsstoffe der ERF-Herstellung enthielten.



Bild 91: Aufgebrochener Partikel in einem Agglomerat aus sedimentierten Partikeln

Bild 92: Zerbrochene Partikel in einem Agglomerat aus sedimentierten Partikeln

An einigen Dornelektroden fiel nach deren Verwendung zunächst eine ablösbare Verschmutzung sowie Verfärbung der Oberfläche im Bereich des homogenen Spaltes auf. Bei näherer Betrachtung waren in einem Fall zusätzlich punktförmig ausgebildete Schäden an der Oberfläche erkennbar. Der Einsatz dieser Elektrode war insofern auffällig, dass es bei Beaufschlagung mit einem elektrischen Feld sehr oft zu elektrischen Spannungsdurchschlägen kam. Bei Betrachtung des Schadensbildes im Rasterelektronenmikroskop wurde deutlich, dass die in Strömungsrichtung festgestellten, punktförmigen Schäden auf Kavitation zurück zu führen sind (Bild 93). Unter Kavitation ist die dynamische Bildung und Implosion von Hohlräumen in Flüssigkeiten durch Druckschwankungen zu verstehen. Sie tritt vor allem bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten auf. Tritt Kavitation an der Oberfläche fester Körper auf, wird das Material an der Oberfläche durch die hohen mechanischen Beanspruchungen zunächst deformiert. Später brechen aus der Oberfläche größere Partikel aus, was auch als Kavitationsfraß bezeichnet wird. Möglicherweise wurde das Auftreten von Kavitation im Betrieb von der Hochspannungsquelle durch die Anzeige von elektrischen Spannungsdurchschlägen detektiert. Hauptsächlich wurden derartige Spannungsdurchschläge bisher metallischen Verschmutzungen oder Lufteinschlüssen in der ERF zugeschrieben. Neben den Bearbeitungsspuren ist in Bild 93 noch angelagertes Fremdmaterial zu sehen, welches auf eine nach der Verwendung aufgetragene Konservierungsschicht zurück zu führen ist.

Bei der Verfärbung der Oberfläche im Bereich des homogen Spaltes handelt es sich um eine Schädigung durch elektrochemische Reaktionen. Aus der Oberfläche wurden großflächig kleine Metallteilchen heraus gelöst (Bild 94). Aufgrund der an der Dornelektrode angelegten Steuerspannung werden aus der Oberfläche der Elektrode Metallionen abgeschieden. Bei dem verwendeten Elektrodenwerkstoff handelt es sich um einen weitgehend rost- und säurebeständigen Stahl mit der Werkstoff-Nummer 1.4305, Werkstoffbezeichnung X8CrNiS18-9. Die Zusammensetzung dieses Werkstoffes wird in Tabelle 15 angegeben.

Der Einfluss des Elektrodenwerkstoffes auf die Druckdifferenz und die Stromaufnahme wurde bereits von WOLFF-JESSE untersucht [Wol1]. Für den Vergleich wurden ein unlegierter Baustahl, ein nichtrostender Chrom-Nickel-Stahl, Aluminium und Messing als Werkstoffe ausgewählt. Dabei schnitt die Werkstoffpaarung Edelstahl – Edelstahl durchgehend positiv ab. Eine Betrachtung, inwieweit die Werkstoffauswahl eine elektrochemische Reaktion begünstigt, wurde jedoch von WOLFF-JESSE nicht durchgeführt. Die von WOLFF-JESSE über die Einsatzdauer festgestellte Anreicherung der ERF mit Metallionen ist möglicherweise jedoch auf elektrochemische Reaktionen zurück zu führen.



Bild 93: Dornelektrode mit Kavitationsschäden in Strömungsrichtung



Bild 94: Dornelektrode mit großflächiger Schädigung aufgrund elektrochemischer Reaktionen

Element	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni
Gehalt [%]	≤ 0,1	≤ 1	≤ <b>2</b>	≤ 0,045	0,15 - 0,35	17 – 19	8 - 10

Die Werkstoffzusammensetzung und insbesondere der Anteil der jeweiligen Legierungselemente haben einen entscheidenden Einfluss auf mögliche elektrochemische Reaktionen. Um elektrochemische Reaktionen zu minimieren, ist bei der zukünftigen Werkstoffauswahl der Gehalt an Legierungselementen in der Wirksumme zusammen zu fassen und zu bewerten. Die Wirksumme W nach DIN 81249-1 [DIN12] ist das Maß für die aus der Legierungszusammensetzung zu erwartende Beständigkeit nichtrostender Stähle sowie mit Chrom und Molybdän legierter Nickel-Basislegierungen gegen Loch- und Spaltkorrosion. Je größer der Wert der Wirksumme ist, desto höher ist die Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion. Sie wird für austenitische Stähle sowie für Nickel-Basislegierungen aus den Massenanteilen von Chrom, Molybdän und Stickstoff entsprechend GI. (61) berechnet [DIN12].

$$W = %Cr + 3.3 \cdot %MO + 30 \cdot %N \tag{61}$$

Bei der ablösbaren Verschmutzung auf der Elektrodenoberfläche handelte es sich um schwarz verfärbte Polyurethanpartikel. Bei der EDX-Analyse dieser Partikel wurden Verunreinigungen durch Eisen, Silizium, Schwefel und Chrom gefunden. Die Ursachen für diese Verunreinigung ist noch nicht vollständig geklärt, sie ist aber vermutlich auch auf die erfolgte elektrochemische Reaktion zurück zu führen.

Ein abrasiver Verschleiß durch die in der ERF enthaltenen Partikel konnte in den eigenen Untersuchungen nicht festgestellt werden.

# 6 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Bisherige Arbeiten auf dem Gebiet der ERF hatten meist die Entwicklung einer technischen Applikation zum Schwerpunkt oder haben sich speziell mit einer einzelnen Methode befasst. Die in dieser Arbeit aufgeführten Methoden zur Charakterisierung von ER-Suspensionen wurden ausgewählt, damit diese Arbeit bei einer späteren Normung von ER-Suspensionen als Grundlage zur Ermittlung von Kennwerten dienen kann.

Das Verhalten der Viskosität als Funktion der Temperatur unter Einfluss der angelegten Feldstärke wurde bisher lediglich für homogene ERF von SCHWARZ [Swz1] und für MRF von ZSCHUNKE [Zsk1] untersucht. In der vorliegenden Arbeit sind elektrorheologische Suspensionen einer derartigen Betrachtung unterworfen worden. Dabei wurde festgestellt, dass die Viskosität bei angelegtem elektrischen Feld zunächst mit der Temperatur ansteigt, wogegen die Viskosität ohne angelegtes elektrisches Feld in Analogie zu konventionellen Ölen mit steigender Temperatur abfällt. Bei ER-Suspensionen, welche Lithiumchlorid enthalten, oder einer entsprechenden Mischung wurde weiterhin festgestellt, dass bei Überschreitung einer spezifischen Temperatur die Viskosität wieder abfällt. Für jede ER-Suspension konnte in Abhängigkeit von Temperatur und Feldstärke eine werden. maximale Viskosität gemessen Das Temperaturverhalten elektrorheologischer Suspensionen wird dabei hauptsächlich durch die in der Formulierung enthaltenen Salze bestimmt. Während ER-Suspensionen, welche Lithiumchlorid enthalten, ihre optimale Einsatztemperatur bereits bei Temperaturen zwischen 40°C und 60°C erreichen, liegt der optimale Temperatureinsatzbereich für ER-Suspensionen, die Zinkchlorid enthalten, oberhalb von 80°C. Ungeachtet dessen erreichen beide Arten bei gleicher Feldstärke auch etwa gleiche Viskositäten. Bei einer Mischung zweier unterschiedlich formulierter ER-Suspensionen kam es zu einer Verschiebung im Viskositäts-Temperatur-Verhalten und zu einer geringfügigen Erhöhung der dynamischen Viskosität.

Bei den unter Kapitel 4 beschriebenen Messungen im Fließkanal wurde festgestellt, dass bei der dynamischen Aufnahme von Fließkurven die Dynamik des Gesamtsystems erfasst wird. Die Ergebnisse sind daher von Zeiteffekten beeinflusst, weshalb sich bei dieser Messmethode keine stationären Verhältnisse einstellen. Daher erfolgte im weiteren Verlauf die Aufnahme der Fließkurven durch quasistatische Messungen. Dabei wurden die Steuerparameter Volumenstrom und elektrische Feldstärke konstant gehalten, um die resultierende Druckdifferenz über dem ER-Spalt zu ermitteln. Die Fließkurve wurde aus den Einzelergebnissen zusammengesetzt.

Bei Verwendung des beschriebenen ER-Ventils ist bei fehlendem elektrischen Feld eine BAGLEY-Korrektur der Ein- und Auslaufdruckverluste nicht erforderlich. Die Notwendigkeit einer solchen Korrektur bei Feldstärken E > 0 kV/mm kann allerdings nicht ausgeschlossen werden. Die hohe Stromaufnahme der verwendeten ERF stand jedoch einer dementsprechenden Betrachtung entgegen.

Bei Verringerung des Querschnitts oder Verlängerung des Drosselspaltes stellen sich über dem ER-Ventil entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten höhere Druckdifferenzen ein. Die Umrechnung der Druckdifferenzen in Schubspannungen und der Volumenströme in Schergeschwindigkeiten führte jedoch nicht zu geometrieunabhängigen Fließkurven. Da es sich bei ER-Suspensionen um nicht-newtonsche Flüssigkeiten handelt, wurde zur Korrektur der Fließkurven in Folge das Korrekturverfahren nach WEISSENBERG / RABINOWITSCH angewandt. Auch diese Korrektur allein führte nicht zu geometrieunabhängigen Fließkurven. Darauf hin wurde das Phänomen des Wandgleitens untersucht. Während in vorangegangenen Untersuchungen stets Wandhaftung als Vereinfachung angenommen wurde, ist in den eigenen Untersuchungen festgestellt worden, dass bei der Auswertung von Fließkurven auch der Effekt des Wandgleitens zu berücksichtigen ist. Diese Erkenntnis wird durch eine aktuelle Veröffentlichung von FILISKO [Fil1], welche erst nach Abschluss der eigenen Untersuchungen recherchiert wurde, bestätigt. Aus den in der eigenen Arbeit gewonnenen Erkenntnissen ergibt sich der Schluss, dass quasistatisch aufgenommene Fließkurven einer Kombination von Korrekturen zu unterziehen sind:

- Korrektur der Ein- und Auslaufdruckverluste nach BAGLEY,
- Korrektur des unbekannten Fließverhaltens nach WEISSENBERG / RABINOWITSCH,
- Korrektur des Wandgleitens nach MOONEY.

Die unter Kapitel 3 aufgeführten Untersuchungsergebnisse aus Messungen mit einem Rotationsrheometer sind nicht mit den Ergebnissen der unter Kapitel 4 aufgeführten Untersuchungsergebnisse aus Messungen im Fließkanal vergleichbar. Bild 95 zeigt eine Gegenüberstellung der scheinbaren Fließkurven. Allein über eine Korrektur nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH ist keine Annäherung der Fließkurven zu erreichen. Folgende Gründe können dafür angegeben werden:

- Im Gegensatz zum Fließkanal, wo die ERF zwischen den feststehenden Elektroden hindurch fließt, wird die ERF im Rheometer durch eine Relativbewegung der Elektroden geschert.
- 2. Zur Vermeidung von Elektrophorese erfolgte im Rheometer eine Beaufschlagung der ERF mit sinusförmigen Wechselfeldern unterschiedlicher Feldstärke bei einer Frequenz von 100 Hz. Aus der Literatur ist bekannt, dass mit fallenden Frequenzen höhere Schubspannungen erzielt werden können. Die höchsten Schubspannungswerte werden dagegen bei Gleichspannung erzielt [Abu1]. Da im Fließkanal das Problem der Elektrophorese nicht relevant ist, konnte dort eine Ansteuerung der ERF mit Gleichspannungsfeldern erfolgen.
- Da die ERF f
  ür die Messungen im Rheometer mit sinusf
  örmigen Wechselfeldern angesteuert wurde, handelt es sich bei der angegebenen Feldst
  ärke um die maximale Feldst
  ärke. Die effektive Feldst
  ärke liegt um den Faktor 0,707 niedriger.
- 4. Die Vermessung der ERF mit dem Rheometer erfolgte nur mit einer Geometrie f
  ür Rotor und Becher. Somit konnte weder das von RECH [Rch1] beschriebene Differenzenverfahren zur Korrektur von Randeinfl
  üssen noch eine Betrachtung zum Wandgleiten durchgef
  ührt werden.

Ein weiteres Kriterium für den Einsatz von ER-Suspensionen ist die Stromaufnahme bzw. Stromdichte. Grundlegend wird die Stromaufnahme durch die Zusammensetzung der ER-Suspension bestimmt, ohne dass jedoch in dieser Arbeit weiterführende Betrachtungen dazu angestellt worden sind. Es wird jedoch gezeigt, dass sich ER-Suspensionen hinsichtlich ihrer Stromaufnahme unterscheiden. Die Stromdichte fällt mit steigender Schergeschwindigkeit, schwillt aber mit steigender Temperatur an. Die Stromaufnahme ist weiterhin proportional zur Spaltlänge. Zusammen mit der Steuerfeldspannung bestimmt die Stromaufnahme den Leistungsbedarf der erforderlichen Hochspannungsquelle. Die Vermessung der für die Fließkanaluntersuchungen hauptsächlich verwendeten ER-Suspension über einen breiten Bereich der Steuerfeldstärke wurde durch deren hohe Stromaufnahme eingeschränkt. Waren bei der Spaltgeometrie mit den Abmessungen D = 40 mm, L = 100 mm und H = 1,0 mm bei 30°C noch Messungen bei einer Feldstärke von 5 kV/mm möglich, so reichte die Leistung der Hochspannungsquelle nicht mehr aus, um bei einer Geometrie mit den Abmessungen D = 30 mm, L = 300 mm und H = 0,7 mm überhaupt ein elektrisches Feld anzulegen.



Bild 95: Gegenüberstellung von Fließkurven aus Untersuchungen am Rheometer und am Normspaltprüfstand

Eine elektrophysikalische Charakterisierung von ERF ist mit genormten Verfahren möglich. Jedoch ist dabei in Betracht zu ziehen, dass die hochempfindlichen Messzellen durch ER-Suspensionen verunreinigt werden, was eine aufwändige Reinigung nach sich zieht.

Das Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen wird wesentlich vom Dichteverhältnis zwischen Grundöl und suspendierten Partikeln bestimmt. Die Sinkgeschwindigkeit der Partikel steigt mit ihrer Größe und der Temperatur.

Die durchgeführten chemischen Analysen dienten zur Klärung der Zusammensetzung sowie der ablaufenden Prozesse in der ER-Suspension bei Ansteuerung mit einem elektrischen Feld und in Abhängigkeit von der Temperatur.

# 7 AUSBLICK

Resultierend aus den Erkenntnissen dieser Arbeit ergibt sich ein weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der ER-Suspensionen.

So besteht zunächst die Notwendigkeit, den Effekt des Wandgleitens mit einem koaxialen Rotationsrheometer zu untersuchen. Benötigt werden dazu verschiedene Geometrien für Rotor und Becher, welche aufeinander abgestimmt sein müssen (Bild 96). Mittels Zwei- oder Dreispaltenmethode kann der Einfluss des Wandgleitens bestimmt und eine diesbezügliche Korrektur der Fließkurven durchgeführt werden [Gil1, Esh1].



Bild 96: Auswahl der Scherspalte bei der Dreispaltenmethode [Esh1]

Weiterhin besteht der Bedarf einer kombinierten Korrektur der Fließkurven, unabhängig davon, ob sie mit dem Rheometer oder durch Fließkanaluntersuchungen aufgenommen worden sind. Als Hilfsmittel zur Korrektur von Fließkurven beschreibt SCHOPFERER [Spf1] die Auswertesoftware CAPICALC, welche am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe entwickelt wurde. Das Programm ermöglicht verschiedene Anpassungsfunktionen Kombination sowie eine der Korrekturverfahren nach BAGLEY, WEISSENBERG/RABINOWITSCH und MOONEY. CAPICALC arbeitet im Verbund mit RHEOTOOL, einem Programm zur Berechnung und Darstellung rheologischer Funktionen. Ein Beispiel für eine kombinierte Korrektur nach WEISSENBERG/RABINOWITSCH und MOONEY zeigt Bild 97. Die begonnenen Fließkanaluntersuchungen sollten dazu unter Verwendung einer verbesserten ER-Suspension mit verringerter Stromaufnahme

durch Betrachtungen zu Ein- und Auslaufdruckverlusten unter Feldeinfluss ergänzt werden.



#### Bild 97: Scheinbare, MOONEY- und WEISSENBERG/RABINOWITSCH-korrigierte Fließfunktionen einer 62%-igen Mischung (Pural / AK 10<sup>6</sup>) [Spf1]

Nicht untersucht werden konnte der Einfluss der Oberflächengüte auf das Wandgleiten. Zwar hat WOLFF-JESSE bei der Analyse des Einflusses der Oberflächengüte auf den ER-Effekt festgestellt, dass Oberflächen mit geringerer Oberflächenrauhigkeit höhere Druckdifferenzen bewirken [Wol1]. Inwieweit die Oberflächengüte einschließlich der festgestellten elektrochemischen Korrosion jedoch die Wandhaftung beeinflusst, ist ebenfalls noch zu klären.

Ein weiterer Beitrag zur Klärung des elektrorheologischen Effekts, zu Fragen der Partikelstruktur, des Temperaturverhaltens und möglicherweise auch zur Stromaufnahme ist durch Anwendung der NMR-Spektroskopie zu erwarten. Mit der Kernresonanzspektroskopie (NMR) können die magnetischen Wechselwirkungen zwischen den Atomkernen sowie deren Verhalten bei Anregung durch äußere magnetische Felder untersucht werden. Vorzugsweise sind dazu die Polyurethanpartikel von der ER-Suspension zu separieren und im Festkörper-NMR zu untersuchen. Mit Blick auf die hohen Schergeschwindigkeiten, wie sie sich bei den Fließkanaluntersuchungen eingestellt haben, sollten bei der Vermessung von ER-Suspensionen mit einem Rheometer zukünftig Geräte Anwendung finden, welche höhere Schergeschwindigkeiten zulassen. In der Literatur wird beispielsweise ein Dynamic Drop Viscometer beschrieben, welches Schergeschwindigkeiten bis 10.000 s<sup>-1</sup> ermöglicht [Kec1]. Weiterhin kann das Thermo RheoStress 600 mit der High Shear Option Schergeschwindigkeiten bis 4500 s<sup>-1</sup> erreichen [HRS1].

Wesentlich erscheint auch, ein Verfahren entsprechend dem aktuellen Stand der Technik zu entwickeln, um das Sedimentationsverhalten von ER-Suspensionen charakterisieren zu können. Weiterhin können aus der Ermittlung der Ruhepenetration am Sediment möglicherweise Rückschlüsse zum Redispergierverhalten gezogen werden.

### Quellenverzeichnis

- Abu1 Abu-Jdayil, B.: Electrorheological Fluids in Rotational Couette Flow, Slit Flow and Torsional Flow (Clutch). Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation; Shaker Verlag Aachen 1996.
- ADT1 BMBF-Verbundprojekt: Adaptronisches Transportsystem mit elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter. 2000; Förderkennzeichen: 13N6986. Projektkoordinator: Universität des Saarlandes
- Bay1 Bayer Silicones Rheobay: Vorläufige Produktinformation Rheobay VP AI 3565 und Rheobay VP AI 3566. Leverkusen 1994
- Bay2 Bayer Silicones Rheobay: Rheobay Damping and Vibrationisolation. Leverkusen 1996
- Blo1 Bloodworth, R.: Electrorheological Fluids Based on Polyurethane Dispersions.
   Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on ER Fluids; Feldkirch;
   Austria; 20.-23.07.1993
- Blo2 Bloodworth, R.; Wendt, E.: Materials for ER Fluids. Actuator 96; Proceedings of the 5<sup>th</sup> Int. Conference on New Actuators; Bremen 26.-28.6.1996
- Böh1 Böhme, G.: Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide. B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 2000
- Brn1 Brunn, P.O.; Abu-Jdayil, B.: A phenomenological model of electrorheological fluids. Rheologica Acta, (2004) 43:62-67
- Con1 Conrad, H. et al.: Characterisation of the Structure of a Modell Electrorheological Fluid Employing Stereology. In: Conrad H,. et al. (Editor), Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on ER-Fluids 1989. Technomic Publications, Lancaster, 1990
- CSD1 Carl Schenck AG: RheAct Der hochdynamische rheo-elektrische Aktuator. Produktinformation; Darmstadt; 03/1998
- DIN1 DIN 1342-2: Viskosität, Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 11/2003
- DIN2 DIN 1342-3: Viskosität, Teil 3: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 11/2003
- DIN3 DIN 38406-08: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung Kationen (Gruppe E) Teil 8: Bestimmung von Zink Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der Luft-Ethin-Flamme (E 8). DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 10/2004

- DIN4 DIN 53765: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren Thermische Analyse
   Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK). DIN Deutsches Institut für Normung
   e.V.; Ausgabe 03/1994
- DIN5 DIN 53521: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung des Verhaltens gegen Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe 11/1987, zurückgezogen 06/2004
- DIN6 DIN ISO 1817: Elastomere Bestimmung des Verhaltens gegenüber Flüssigkeiten. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe 06/2004
- DIN7 DIN 61166-1: Sedimentationsanalyse im Schwerefeld Sedimentationswaage. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 11/1973
- DIN8 DIN 51562-1: Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimter, Teil 1 – Bauform und Durchführung der Messung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 01/1999
- DIN9 DIN 53014-1: Kapillarviskosimeter mit Kreis- und Rechteckquerschnitt zur Bestimmung von Fließkurven, Teil 1 - Grundlagen, Begriffe, Benennungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 02/1994
- DIN10 DIN EN 60247\*VDE 0380-2: Isolierflüssigkeiten Messung der Permittivitätszahl, des dielektrischen Verlustfaktors (tanδ) und des spezifischen Gleichstrom-Widerstandes (IEC 60247:2004). DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 01/2005
- DIN11 DIN EN 60156\*VDE 0370-5: Isolierflüssigkeiten Bestimmung der Durchschlagspannung bei Netzfrequenz. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Ausgabe 03/1996
- DIN12 DIN 81249-1: Korrosion von Metallen in Seewasser und Seeatmoshäre, Teil 1
   Begriffe und Grundlagen. DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e.V.; Ausgabe 11/1997
- Drf1 Dörfler, H.-D.: Grenzflächen- und Kolloidchemie. VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 1994
- Dyk1 Dyke, S.J.; Spencer, B.F.: Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction. Dept. of Civil Engineering; Washington University; St. Louis; MO; 1996
- Ech1 Eich, A.: Elektrorheologie homogener Systeme Nematische Flüssigkristalle und isotrope Polymerlösungen. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Dissertation, 2002
- Eck1 Eckart, W.: Theoretische Untersuchungen von elektrorheologischen Flüssigkeiten bei homogenen und inhomogenen elektrischen Feldern. Shaker Verlag Aachen, Dissertation, 2000
- Esh1 Eischen, J.-C.: Bildanalytische und rheologische Untersuchungen zum Orientierungs- und Strukturierungsverhalten von faserförmigen Partikeln in laminaren Scherströmungen. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1999
- Fes1 Fees, G.: Hochdynamischer elektrorheologischer Servoantrieb für hydraulische Anlagen. Dissertation; Shaker Verlag Aachen; 2004
- Fes2 Fees, G.: Study of the static and dynamic properties of a highly dynamic ER servo drive. O+P Ölhydraulik und Pneumatik; 45. Jg. 2001, Nr. 1
- Fil1 Filisko, F.E.: Alternative View for Yield Stress of ER/MR Materials. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, 18.-22.06.2006, Lake Tahoe, U.S.A.
- Flu1 N.N.: Vorhaben "Feldversuch elektrorheologische Flüssigkeiten Stufe 1".Abschlussbericht; Darmstadt 2004
- Flu2 N.N.: Produktinformation RheCon. FLUDICON GmbH, Darmstadt 2004
- Flu3 N.N.: Produktinformation RheAct. FLUDICON GmbH, Darmstadt 2004
- Flu4 N.N.: Produktinformation RheDamp. FLUDICON GmbH, Darmstadt 2004
- Flu5 N.N.: Vorhaben "Entwurf, Konzipierung und Prototypenerstellung einer repositionierenden, geregelten Schocklagerung". FLUDICON GmbH; Abschlussbericht; Darmstadt 2004
- Flu6 N.N.: Normspaltprüfstand zur Untersuchung der Werkstoffeigenschaften der weiterentwickelten elektrorheologischen Flüssigkeit RheOil 2.1. FLUDICON GmbH; Abschlussbericht; Darmstadt 2003
- Gar1 Gardiner, B.S.; Dlugogorski, B.Z.; Jameson, G.J.: Prediction of Pressure Losses in Pipe Flow of Aqueous Foams. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 38, No. 3, 1999, pp. 1099-1106
- Gil1 Gilmour, J.A.; Dlugogorski, B.Z.; Kennedy, E.M.: A Wall Slip Correction Method for Use with Macrostructured Liquids in Couette Rheometers. Proceedings of the 26<sup>th</sup> Australasian Chemical Engineering Conference (Chemeca 98), Port Douglas, Australia; 1998
- Han1 Han, Y.M.; Choi, S.B.: Preisach Model of ER Fluids Considering Temperature
  Variations. 9<sup>th</sup> International Conference on ER Fluids and MR Suspensions,
  30.08.-03.09.2004, Peking

- Hap1 Happel, J.; Brenner, H.: Low Reynolds Number Hydrodynamics. 2<sup>nd</sup> Edition, Noordhoff International Publishing, Leyden 1973
- Hch1 Hochstein, B.: Rheologie von Kugel- und Fasersuspensionen mit viskoelastischen Matrixflüssigkeiten. Dissertation; Technische Hochschule Karlsruhe; 1997
- HRS1 N.N.: HAAKE RheStress 600 Das modulare High-Tech Rheometer. Thermo Electron (Karlsruhe) GmbH. Produktinformation, Karlsruhe, 2005
- Jen1 Jendritza, D.; et.al.: Technischer Einsatz neuer Aktoren Grundlagen; Werkstoffe, Designregeln und Anwendungsbeispiele. Expert Verlag; 2. Auflage 1998
- Kam1 Kamath, G.M.; Wereley N.M.: A nonlinear viscoelastic-plastic model for electrorheological fluids. Smart Materials and Structures 6 (1997), pp. 351-359
- Kch1 Kuchling, H.: Physik. Fachbuchverlag Leipzig, 19. Auflage, 1989
- Kec1 Kecskes, L.J.: ER Fluid Characterization Using Dynamic Drop Viscometry. The Society of Rheology 72<sup>nd</sup> Annual Meeting 2001, Hilton Head Island, U.S.A.
- Kem1 Kemmetmüller, W.; Kugi, A.: Nonlinear Control in Electrorheological Fluid Devices. Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Control, Vienna, Austria, July 12-15, 2004, Vol. 1, M9-9 – M9-12
- Kem2 Kemmetmüller, W.; Kugi, A.: Modeling and Control of an Electrorheological Actuator. 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Sydney, Australia, 06.-08.09.2004, pp. 271-276
- Liu1 Liu, Y.; Gordaninejad, F.; et.al.: Temperature Dependent Skyhook Control of HMMWV Suspension Using a Fail-Safe Magneto-Rheological Damper. Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Conference, Industrial and Commercial Applications, Ed. by E.H. Anderson, Vol. 5054, 2003, pp. 332-340
- Lmp1 Lampe, D.: Untersuchungen zum Einsatz von magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen; Dissertation; TU Dresden; 2000
- Lrd1 N.N.: MR 180 kN Damper: Preliminary Product Bulletin; Lord Corp., 2002
- Lrd2 N.N.: MR Brake MRB-2107-03; Product Bulletin; Lord Corp., 2003
- Mak1 Makris, N.: Rigidity-Plasticity-Viscosity Can Electrorheological Dampers Protect Base-isolated Structures from Near-source Ground Motions? Earthquake Engineering and Structural Dynamics; Vol. 26; 1997
- Mch1 Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. Carl Hanser Verlag München, 4. Auflage 1999
- Mer1 Merten, A.: Untersuchungen zu Fließinstabilitäten bei der Extrusion von Polymeren mit der Laser-Doppler Anemometrie. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2005

- Moo1 Mooney, M.: Explicit formulas for slip and fluidity. J. Rheol., 2:210 222, 1931.
- Mur1 Murrenhoff, H.: Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 1 Hydraulik. Vorlesungsumdruck, 4. neu überarbeitete Auflage, Aachen, 2005
- Odb1 Odenbach, S.: Ferrofluide ihre Grundlagen und Anwendungen. Physik in unserer Zeit; 32. Jg. 2001, Nr. 3
- Pah1 Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere. 4. überarbeitete Auflage, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik Düsseldorf, 1995
- Pan1 Pan, X.-D.; McKinley, G.H.: Simultaneous Measurement of Viscoelasticity and Electrical Conductivity of an Electrorheological Fluid. Langmuir (Letter) Vol. 14 (5) 1998, pp. 985-989
- Pat1 Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: Hydrodynamischer Rohrwaffendämpfer, dessen Viskosität veränderbar ist; Patent 198 32 495 C 1; 1999
- Pat2 Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: Repositionierende, geregelte Feder-Dämpfer-Systeme für große Verschiebungen; Patent 102 36 514 A 1; 2004
- Pra1 Prandtl, L.; Oswatitsch, K.; Wieghardt, K.: Führer durch die Strömungslehre. Vieweg Verlag Braunschweig; 8. vollst. überarb. Auflage, 1984
- Rab1 Rabinowitsch, B.: Über die Viskosität und Elastizität von Solen. Zeitschrift für physikalische Chemie, A 145/1929. J. Rheol., 2:210 222, 1931
- Raj1 Rajagopal, K.R.; Wineman, A.S.: Flow of electro-rheological materials. Acta Mechanica, Vol. 91, 1992, pp. 57-75
- Rch1 Rech, B.: Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten. Dissertation; Verlag Mainz; 1996
- Rdm1 Rodermund, H.: Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Mineralölen aus dem Viskositätsgrad. Schmiertechnik + Tribologie; 02/1978
- RWE1 Electrorheological Fluid EPS 3301; Produktinformation der RWE-DEA AG Hamburg; 1994
- Sdr1 Schneider, S.: Elektrorheologische Flüssigkeiten Ein Überblick. Soldat und Technik, 41. Jg., 2/1998, Seite 139
- Sdr2 Schneider, S.: Elektrorheologische Flüssigkeiten Mögliche Anwedungen in der Wehrtechnik. Wehrtechnik spezial; 37. Jg. V/2005, S. 108-112
- Sdr3 Schneider, S.: Heiß oder kalt? Das Temperaturverhalten elektrorheologischer Flüssigkeiten. O+P Ölhydraulik und Pneumatik; 50. Jg., 01/2006, S. 29-32

- Sdr4 Schneider, S.; Eibl, S.: Heiß oder kalt? Betrachtungen zur Beschreibung des elektrorheologischen Effektes bei elektrorheologischen Suspensionen. O+P Ölhydraulik und Pneumatik; 50. Jg., 02/2006, S. 84-87
- Spf1 Schopferer, M.: Untersuchungen zum Wandgleiten konzentrierter Suspensionen. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik; Diplomarbeit; November 2004
- Spu1 Spurk, J.H.; Zhen, H.: Electrorheoloical Material under Oscillatory Shear. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4 – July 1993
- Srm1 Schramm, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH Karlsruhe; 2. Auflage, 1995
- Sta1 N.N.: SVM 3000 Stabinger Viskosimeter. Anton Paar GmbH Graz, Österreich, Produktinformation, 07/2005
- Sta2 ASTM D 7042-04: Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity).
   American Society for Materials and Testing, Ausgabe 2004
- Sti1 Stiebel, C.: Der "Himmelshaken" Transportgüter schweben scheinbar über der Fahrbahn. Magazin Forschung; Universität des Saarlandes; 02/2000
- Sti2 Stiebel, C.; Janocha, H.: Entwicklung einer Ansteuerelektronik und eines aktiven Lagersystems für adaptronische Transportsysteme mit elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter – Abschlussbericht. LPA, Universität des Saarlandes Saarbrücken; 03/2000
- Sun1 Sunakoda, K.; Sodeyama, H.: Dynamic Charakteristics of Magneto-Rheological
  Fluid Damper; 7<sup>th</sup> Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials;
  2000
- SVU1 N.N.: SVU 6000/16 Schaltender Leistungsverstärker für elektrorheologische
  Flüssigkeiten und ohmsch-kapazitive Lasten. Bedienungsanleitung,
  D\*ASS mbH Saarbrücken, 1998
- Swz1 Schwarz, S.: Elektrorheologische Fluide Charakterisierung und Anwendungen. Dissertation; VDI Verlag; 1997
- Swz2 Schwarz, S.: Application of an Electrorheological Fluid within Hydrodynamic Steering Aid. Actuator 98; 6<sup>th</sup> Int. Conference on New Actuators; 17.-19.6.1998
- TCM1 U.S. Army Tank Automotive and Armament Command: MR Fluid Semiactive Suspension. Präsentation, Warren, MI; 2003
- Ubl1 Ubbelohde, L.: Zur Viskosimetrie mit Umwandlungs- und Rechentabellen. Hirzel Verlag Stuttgart; 1965

- Wah1 El Wahed, A.K.; Sproston, J.L.: Electrorheological Fluids Applied to Impulsive Loads. Actuator 98; 6<sup>th</sup> Int. Conference on New Actuators; 17.-19.6.1998
- Web1 N.N.: Seismic Protection. http://www.lord.com/tabid/3354/Default.aspx; Lord Corp., 2006
- Web2 N.N.: Motion Master® Ride Management System. http://www.lord.com/tabid/3362/Default.aspx; Lord Corp., 2006
- Win1 Winslow, W.M.: Induced Fibration of Suspensions. Journal of Applied Physics;Volume 20; 1949; pp. 1137-1140
- Wol1 Wolff-Jesse, C.: Untersuchung des Einsatzes elektrorheologischer Flüssigkeiten in der Hydraulik. Dissertation; Verlag Mainz; 1997
- Wol2 Wolff-Jesse, C.; Fees, G.: Examination of flow behaviour of electrorheological fluids in the flow mode. Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part I; 1998
- Wor1 Wortberg, J.; Schmachtenberg, E.: Einführung in die Kunststofftechnik.
  Übungsskript, Institut für Kunststofftechnik und Kunststoffmaschinen; Essen,
  2000
- Wun1 Wunderlich, T.: Der Einfluss der Elektrodenoberfläche und der Strömungsform auf den elektrorheologischen Effekt. Dissertation; Universität Erlangen-Nürnberg; 2000
- Yas1 Yasufumi, O.; Kazuya, E.: Creep behavior of electrorheological fluids. Journal Rheology 38 (6), November/ December 1994, pp. 1721-1733
- You1 Choi, Y.D.; Sang, G.K.: Viscoelastic Properties of Electrorheological Fluids.
  Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials; AMD-Vol. 217, 1996, pp. 301-307
- Zau1 Zaun, M.: Elektrorheologische Ventile für Zylinderantriebe. O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 48. Jg., 07/2004, S. 445-448
- Zau2 Zaun, M.: Design Concept for the Development of Cylinder Drives Based on Electrorheological Fluids. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions Beijing 2004
- Zau3 Zaun, M.: Antriebe mit kurzen Reaktionszeiten Zylinderantriebe auf Basis elektrorheologischer Flüssigkeiten. O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 49. Jg., 05/2005, S. 351-355
- Zau4 Zaun, M.; Adenstedt, R.: Trends in Electrorheological Valve Development. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Fluidpower Conference, Dresden, 2004, pp. 533-544
- Zau5 Zaun, M.: Persönliche Kommunikation, wissenschaftlicher Mitarbeiter, RWTH Aachen 08/2006

Zsk1 Zschunke, F.; Rivas, R.; Brunn, P.O.: Temperature Behavior of Magnetorheological Fluids. Applied Rheology; Vol. 15, Iss. 2, 2005, pp. 116-121

## Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Steffen Schneider geboren am 11. Februar 1966 in Borna verheiratet, zwei Kinder

## Bildungsgang:

	1972-1982	Zehnklassige Allgemeinbildende Oberschule in Deutzen	
	1982-1985	Lehre als Instandhaltungsmechaniker mit Abitur an der	
		Betriebsberufsschule Regis-Breitingen	
	1988-1993	Studium an der Technischen Universität Chemnitz	
		Hauptfächer:	Werkzeugmaschinenkonstruktion
			Tribotechnik
	1993	Abschluss als Diplom-Ingenieur	
	1994-1995	Referendariat im höheren technischen Dienst beim	
		Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung Koblenz	
		Fachrichtung Wehrtechnik, Fachgebiet Kraftfahr- und	
		Gerätewesen	
	1995	Abschluss als Bauassessor	
Berufspraxis:			
	1993-1994	Projekt- und Entwick	lungsingenieur bei der
		HECKERT Umwelttechnik GmbH Chemnitz	
	seit 1995	Dezernent am Wehr	wissenschaftlichen Institut für Werk-,
		Explosiv- und Betriebsstoffe,	

2000-2001 Exchange Engineer am U.S. Army Tank-Automotive and Armaments Command, Warren MI, USA

Geschäftsbereich Betriebsstoffe / Tribologie

## ISSN 0939-2343

