

# **Elektrorheologische Flüssigkeiten – Versuch einer Optimierung**

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung und Zielsetzung
2. Vorversuche
3. Stäube
4. Öle
  - 4.1 Bestimmung der Viskosität
  - 4.2 Elektrischer Widerstand
  - 4.3 Bau eines Hochspannungsgerätes
5. Experimente mit selbst gemischten elektrorheologischen Flüssigkeiten
  - 5.1 Versuche im Kölschglas
  - 5.2 Suche nach optimalen Elektroden
  - 5.3 Versuche mit 3 ERFs
6. Ausblick
7. Literaturliste

## **Kurzfassung**

Das Besondere an einer elektrorheologische Flüssigkeit (ERF) ist ihre Fähigkeit, ihren Aggregatzustand innerhalb von wenigen Millisekunden von flüssig zu fest und umgekehrt zu ändern. Diesen Effekt haben wir in unserer Arbeit von verschiedenen Gesichtspunkten aus untersucht und interessante und überraschende Ergebnisse erzielt. Zahlreiche Probleme mussten gelöst werden, damit wir mit der systematischen Suche nach einer optimalen elektrorheologischen Flüssigkeit für die jeweils gewünschte Anwendung beginnen konnten.

## **1. Einleitung und Zielsetzung**

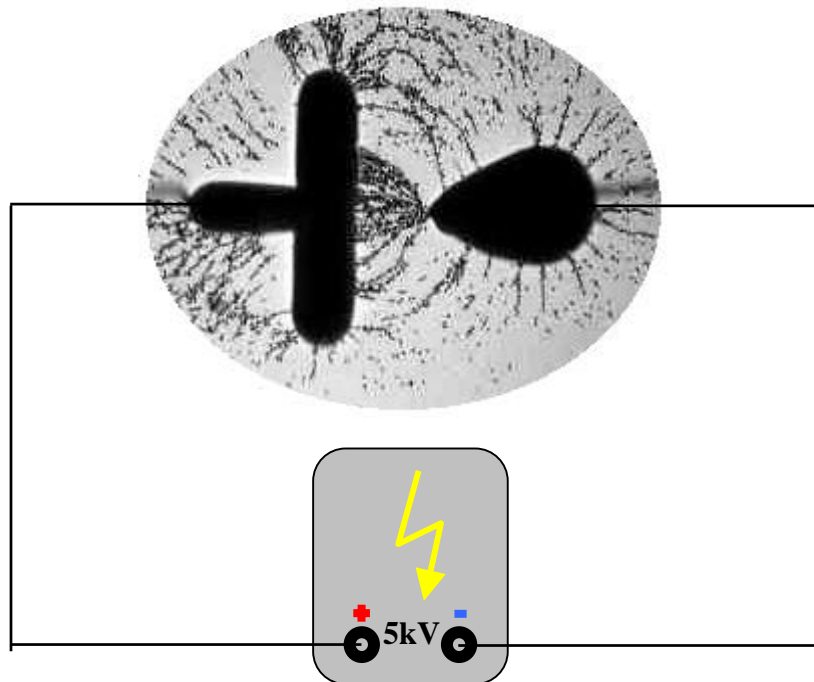
Nachdem wir, d.h. Heiko Burau, Stefan Hück, Enrico Skoruppa und Matthias Turinsky im Internet das aktuelle Forschungsthema „elektrorheologische Flüssigkeiten“ entdeckt hatten, sammelten wir gemeinsam Informationen zur Theorie und führten erste Versuche durch. Leider konnten wir als Vierergruppe nicht am Wettbewerb teilnehmen. Schließlich bestand die einzige Lösung darin, unser Thema aufzuspalten. Während sich Enrico und Matthias in ihrer Arbeit „Angewandte Elektrorheologie“ praxisnahen Anwendungen der Elektrorheologie zuwandten, widmeten wir uns der Grundlagenforschung und den theoretischen Grundlagen dieses aktuellen Themas.

Das Besondere an einer elektrorheologische Flüssigkeit (ERF) ist ihre Fähigkeit, ihren Aggregatzustand innerhalb von wenigen Millisekunden von flüssig zu fest und umgekehrt zu ändern. Damit das funktioniert, muss man eine Hochspannung an die ERF anlegen, sodass sich ein elektrisches Feld bildet. Die ERF besteht aus Öl und Mikropartikeln, die im elektrischen Feld zu Dipolen werden und lange Ketten bilden. Diese Ketten fixieren das Öl-Staub-Gemisch und lassen es fest werden.

Das Ziel unserer Arbeit ist, die optimale Mischung für eine ERF zu finden. Optimal bedeutet, das richtige Gemisch für die jeweils gewünschte Anwendung.

## 2. Vorversuche

Erster Vorversuch: Nach dem wir uns über elektrorheologische Flüssigkeiten informiert hatten, führten wir zuerst den aus den Physikunterricht bekannten Grießkornversuch durch. Mit ihm kann man sich anschaulich die Funktionsweise einer elektrorheologischen Flüssigkeit (ERF) klarmachen. Bei normalen ERF verwendet man anstelle von Grießkörnern feine Stäube, die man mit bloßem Auge nicht erkennen kann.



Der Grießkornversuch

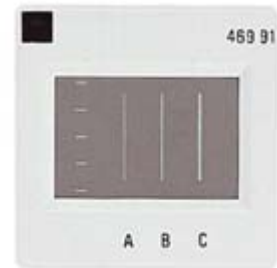
Zweiter Vorversuch: Bei unserem 2. Vorversuch zerrieben wir die Grießkörner in einem Mörser zu Staub. Diesen Staub vermischten wir mit dem Rizinusöl. Als wir 25kV Spannung angelegt haben, wurde diese einfache ERF fast fest. Man konnte mit einem Glasstab einen Graben durch diese ERF ziehen ohne das sie zusammenlief. Doch als wir die Spannung abschalteten, lief die ERF sofort wieder zusammen. Dieser Versuch übertraf unsere Erfahrungen und machte deutlich, dass es sehr lohnenswert ist, sich näher mit diesem Thema zu befassen. Jetzt waren wir sehr optimistisch und wir machten uns auf den Weg, um das optimale Öl mit den optimalen Mikropartikeln zu suchen und zu finden.



Der Graben schließt sich, wenn man die Spannung abschaltet.

### 3. Stäube

Damit sich die ERF verfestigt, muss eine Öl-Staub-Mischung vorliegen. Je nach Mischung ändern sich die Eigenschaften der ERF. Wir dachten, je kleiner die Stäube sind, desto mehr Dipole sind im Öl. Da wir in unseren Versuchsreihen insbesondere den Zusammenhang zwischen der Größe der Staubkörner und der Viskosität der ERF ermitteln wollten, war es notwendig, die Staubkorngrößen zu messen. Um einen Mittelwert zu erhalten, wollten wir den Durchmesser einer festgelegten Anzahl von Staubkörnern unter dem Mikroskop bestimmen. Das Problem war, wir wussten nicht, wie viel ein Millimeter auf dem Bildschirm (das Mikroskop war an einen Monitor angeschlossen) in Wirklichkeit entspricht. Was wir brauchten war ein Referenzmaß, das mindestens eine Genauigkeit von einem Mikrometer besitzt, weil wir aus verschiedenen Quellen wussten in welcher Größenordnung ein Staubkorn liegt.



Wir suchten uns in der Physiksammlung eine Metallblende mit schmalen Spalten (siehe Abb. 3.1). Die Spaltbreite A wollten wir als Referenzmaß nutzen. Um sie zu messen nahmen wir einen Laser ( $\lambda = 632,8\text{nm}$ ) und ließen sein Licht durch den Spalt A fallen. Auf der Leinwand wurden mehrere Linien sichtbar. Mit der Formel  $b \cdot \sin \alpha_k = k \lambda$  kann man dann die Spaltbreite b berechnen. Für den Spalt A erhielten wir den Wert  $b = 123\mu\text{m}$ . Mit diesem Wert konnten wir nun den Vergrößerungsfaktor bestimmen (siehe Tabelle).

Objektiv- Bezeichnung	Vergrößerungs- faktor	1 mm auf dem Commodore-Monitor entspricht in der Wirklichkeit [ $\mu\text{m}$ ]
4	113	8,8
10	340,5	2,9
40	1258	0,8

Nun konnten wir unter dem Mikroskop auch die Größe unserer Staubkörner messen.

Staub	Größe [ $\mu\text{m}$ ]
Grießmehl (gemörsert)	19,88
Zeolith (Sorte 1)	6,02
Zeolith (Sorte 2)	1,59

In den folgenden Versuchen benutzten wir für Zeolith Sorte 2, da die Staubkorngröße dort kleiner ist als bei Sorte 1. Das bedeutet, dass Sorte 2 mehr Dipole bilden kann.

## 4. Öle

### 4.1 Bestimmung der Viskosität

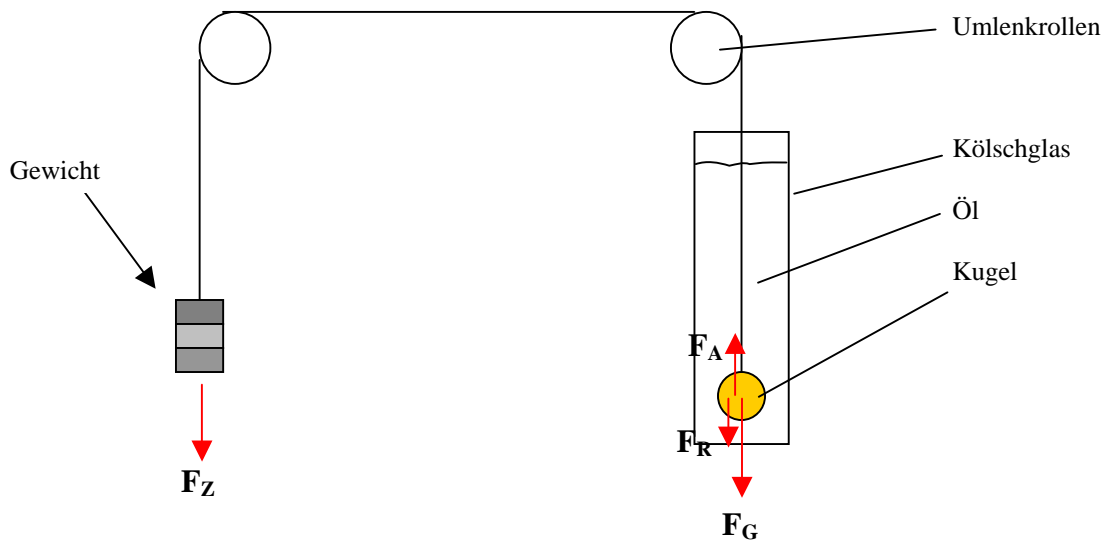
Um die Zähigkeit (dynamische Viskosität) eines Öls zu bestimmen, benötigt man das Stokesche Reibungsgesetz.

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

$F_R$	Reibungskraft [N]
$\eta$	dynamische Viskosität der Flüssigkeit [Pas = Nsm <sup>-2</sup> ]
$r$	Radius der Kugel [m]
$v$	Relativgeschwindigkeit (bei uns Geschwindigkeit der Kugel) [ms <sup>-1</sup> ]

Normalerweise lässt man eine Kugel in die zu messende Flüssigkeit absinken. Da elektrorheologische Flüssigkeiten undurchsichtig sind und außerdem so zäh werden können, dass selbst eine Bleikugel zu leicht ist um in ihr abzusinken, haben wir uns für den unten beschriebenen Versuchsaufbau entschieden. Diesen Versuchsaufbau wollten wir, auch wenn nicht zwingend notwendig, zur Bestimmung der Viskosität unserer Öle benutzen.

Bei unserer Versuchsanordnung wird die Kugel von einem Gewicht über Umlenkrollen nach oben gezogen. Dies hat den Vorteil, dass die Zugkraft  $F_Z$  viel größer sein kann als die Gewichtskraft der Kugel. Außerdem kann man die Geschwindigkeit des ziehenden Gewichtes leicht messen.



$F_Z$	Gewichtskraft vom Gewicht
$F_A$	Auftriebskraft
$F_R$	Reibungskraft
$F_G$	Gewichtskraft der Kugel

Wenn die Geschwindigkeit konstant ist, heben sich alle Kräfte auf. Es gilt also :

$F_R + F_G = F_A + F_Z$ , daraus folgt:

$$F_R = F_A + F_Z - F_G$$

Um jetzt die Viskosität auszurechnen, mussten wir nur die folgende Herleitung vornehmen:

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{F_R}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{F_Z + F_A - F_G}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{m_Z \cdot g + m_{\text{Öl}} \cdot g - m_{\text{Kugel}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

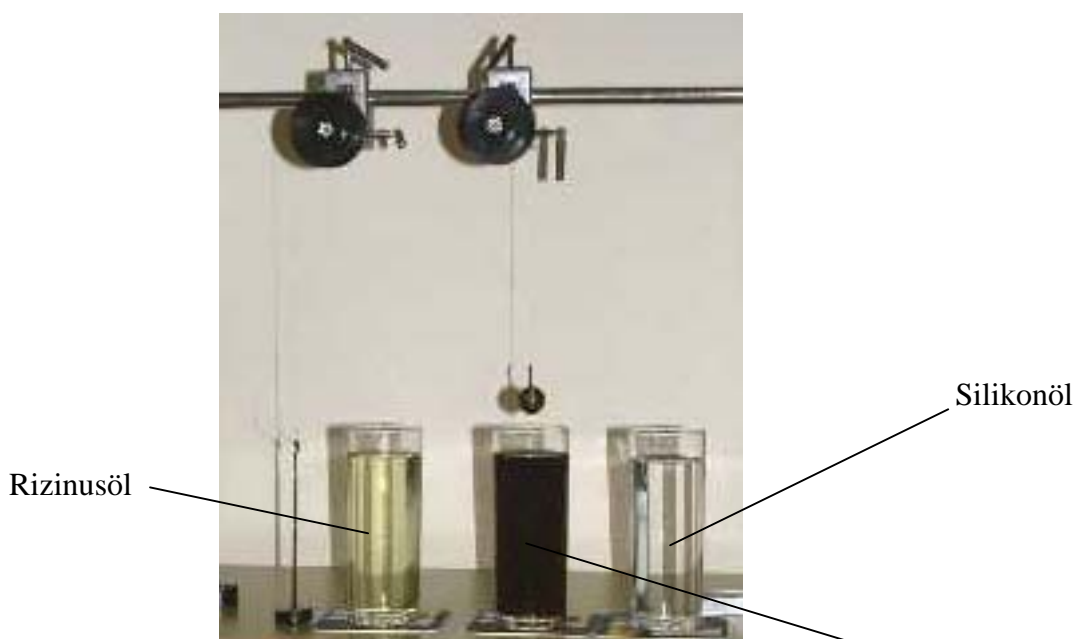
$$\eta = \frac{m_Z \cdot g + \rho_{\text{Öl}} \cdot V \cdot g - m_{\text{Kugel}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

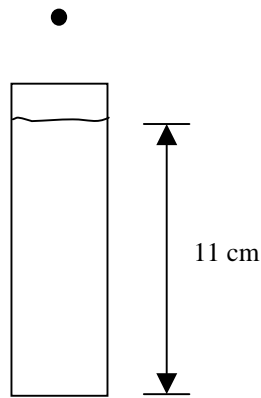
$$\eta = \frac{(m_Z + \rho_{\text{Öl}} \cdot V - m_{\text{Kugel}}) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

Es ergab sich jedoch ein Problem:

Bei Rizinusöl und Motoröl war die Zeit, die die Kugel benötigte um zur Oberfläche zu gelangen, nur mit großen Fehlern messbar. Bei dem Silikonöl konnte sie überhaupt nicht sinnvoll bestimmt werden. Wir mussten also auf die übliche Methode zurückgreifen.

Wir ließen eine kleine Bleischrotkugel in den Ölen absinken.





Öl	Benötigte Zeit
Rizinusöl	9,5 Sekunden
Motoröl 15W40	2,5 Sekunden
Siliconöl	-

Bei Siliconöl fiel aber die kleine Bleischrotkugel immer noch viel zu schnell. Daher nahmen wir einen hohen Standzylinder und füllten ihn bis zu einer Höhe von 22cm mit Siliconöl. Die Kugel benötigte 1,3 Sekunden.

Aufgrund des geänderten Versuchsaufbaus konnten wir jedoch die oben hergeleitete Formel nicht mehr benutzen. Die passende Formel ergibt sich nun wie folgt:

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{F_R}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{F_G - F_A}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{m_G \cdot g + m_{\text{Öl}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{m_G \cdot g + \rho_{\text{Öl}} \cdot V_{\text{Öl}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$

$$\eta = \frac{(m_G + \rho_{\text{Öl}} \cdot V_{\text{Öl}}) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v}$$



Nun haben wir in der Physiksammlung ein Buch [4] gefunden, in dem zusätzlich zur oben genannten Formel ein Korrekturfaktor  $\beta$  angegeben wird, der dazu dient, ein besseres Ergebnis zu erhalten. Die endgültige Formel in unserem Beispiel lautet jetzt wie folgt:

$$\eta_{\text{öl}} = \frac{(m_G - \rho_{\text{öl}} \cdot V_{\text{öl}}) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v \cdot \beta}$$

Für Silikonöl ergibt sich mit unseren Messwerten nun folgende Rechnung:

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = \frac{(m_{pb} - \rho_{\text{öl}} \cdot V_{\text{öl}}) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v \cdot \beta}$$

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = \frac{(m_{pb} - \rho_{\text{öl}} \cdot V) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v \left(1 + 2,1 \frac{r}{R}\right)}$$

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = \frac{\left(0,022g - \frac{0,958g}{cm^3} \cdot 0,0019cm^3\right) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{6 \cdot \pi \cdot 0,0006m \cdot 1,69 \frac{m}{s} \cdot \left(1 + 2,4 \frac{0,6mm}{10mm}\right)}$$

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = \frac{0,0201798 \cdot 10^{-3} kg \cdot 9,81ms^{-2}}{0,0191135m^2s^{-1} \cdot 1,144}$$

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = 9,1 \cdot 10^{-3} kgm^{-1}s^{-1}$$

$$\eta_{\text{Silikonöl}} = \underline{\underline{9,1mPas}}$$



## 4.2 Elektrischer Widerstand

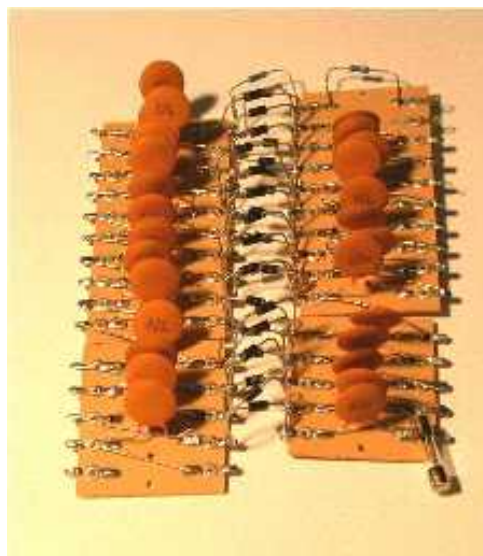
Ein Kriterium für die Auswahl der Öle war auch der spezifische elektrische Widerstand. Je höher der Widerstand, desto kleiner ist nämlich der Strom der fließt. Und ein hoher Strom bedeutet, dass viel Energie verbraucht wird. Es war also wichtig ein Öl zu finden, das einen möglichst hohen Widerstand hat. Zuerst hielten wir einfach die Elektroden von einem normalen Widerstandsmessgerät in das jeweilige Öl. Aber jeder Widerstand war höher als das Messgerät anzeigen konnte ( $R_{\max} = 20\text{M}\Omega$ ). Also machten wir folgendes: Wir nahmen ein Hochspannungsnetzgerät und schlossen daran direkt die Elektroden und ein Hochspannungsmessgerät parallel an. Dann drehten wir die Spannung auf einen bestimmten Wert und schalteten danach das Netzgerät aus. Da sich große Kondensatoren im Netzgerät befinden, sinkt die Spannung nur langsam ab, wenn der äußere Stromkreis einen sehr hohen Widerstand hat. So konnten wir über die Zeit, die die Kondensatoren zum Entladen brauchten, die Widerstände der Öle vergleichen. Konkret ließen wir die Spannung von 5kV auf 2,5kV absinken, und maßen die Zeit (die Zeiten sind natürlich Mittelwerte):

Rizinusöl	51,04 sek
Motoröl	32,95 sek
Silikonöl	51,14 sek

Auffallend ist, die sehr geringe Zeit beim Motoröl. Es ist also hinsichtlich des Widerstandes nicht so gut geeignet wie Rizinusöl und Silikonöl.

## 4.3 Bau eines Hochspannungsgerätes

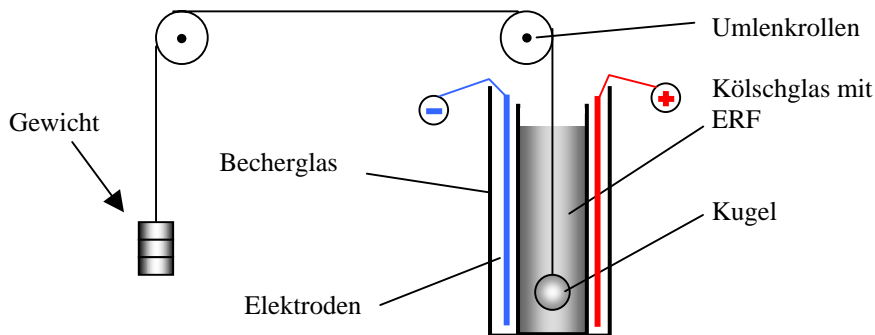
Nach Anleitung aus [3, Seite 186] bauten wir uns für unsere Versuche ein eigenes Hochspannungsgerät. Es besteht aus einer Vielzahl von Kondensatoren und Dioden und liefert eine Spannung 5500V. Sein Gebrauch ist vollkommen ungefährlich, da die auftretenden Ströme sehr klein sind.



## 5. Experimente mit selbst gemischten elektrorheologischen Flüssigkeiten

### 5.1 Versuche im Kölschglas

Unsere Apparatur zum messen der Viskosität einer ERF im Kölschglas haben wir in Kapitel 4.1 beschrieben. Weil wir aber nicht nach jedem Versuch die Elektroden säubern wollten, setzten wir das Kölschglas mit der elektrorheologischen Flüssigkeit in ein großes Becherglas. Zwischen Becherglas und Kölschglas steckten wir dann die Elektroden.



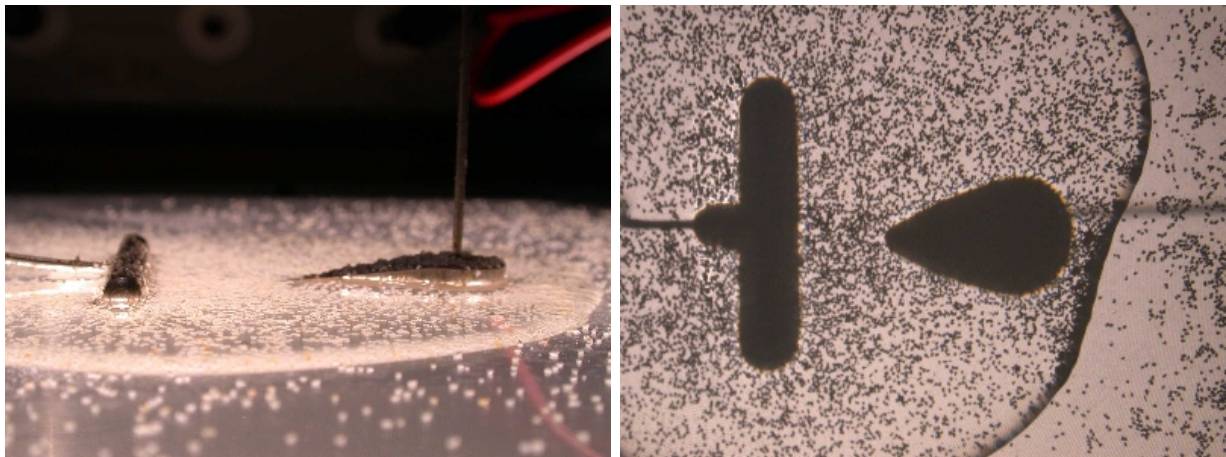
Mit der oben aufgeführten Versuchsanordnung konnten wir jedoch keine sinnvolle Messungen durchführen, denn bei jeder ERF konnten wir nur minimale Unterschiede der Viskosität bei angelegter und bei nicht angelegter Spannung messen. Wir kamen dann zu dem Schluss, dass das elektrische Feld nicht richtig auf die ERF einwirken konnte, weil das Kölschglas das Feld vermutlich sehr stark schwächt. Deshalb tauchten wir nun die Elektroden direkt in die ERF. Die Ergebnisse waren schon besser, aber wir waren trotzdem enttäuscht, weil die Unterschiede zwischen flüssig und fest weit hinter unseren Erwartungen zurückblieben.

Zuerst wussten wir nicht was wir machen sollten, doch dann beschlossen wir, uns das Feld zwischen unterschiedlichen Elektroden einmal mit dem im Kapitel 2 beschriebenen Gießkorn genauer anzusehen.

## 5.2 Suche nach optimalen Elektroden

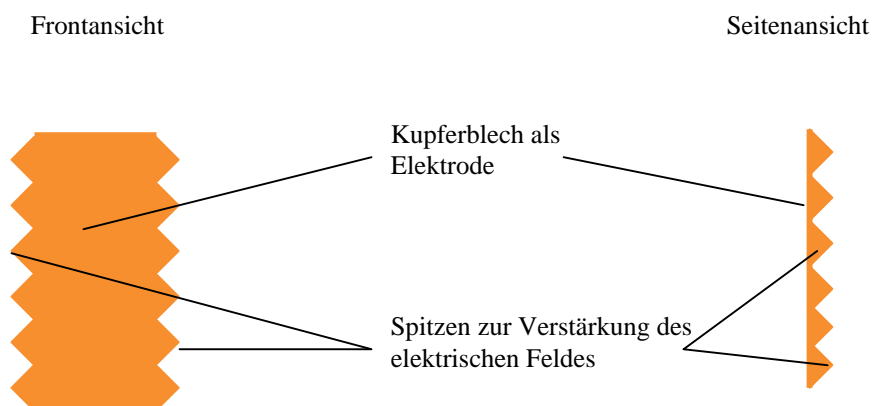
Um uns ein Bild von dem Feld zwischen den Elektroden machen zu können, wiederholten wir den Grießkornversuch. Da wir in Kapitel 3.1 herausgefunden haben, dass Silikonöl eine deutlich geringere Viskosität als Rizinusöl hat, kamen wir auf die Idee, dass sich der aus der Physik bekannte Grießkornversuch bestimmt viel besser mit Silikonöl durchführen lassen würde als mit Rizinusöl, da sich die Grießkörner im Silikonöl ja viel leichter bewegen können. Weiterhin besitzen nach unseren Messungen in Kapitel 4.2 beide Öle den gleichen spezifischen Widerstand.

Nun stellten wir aber zu unserem Überraschen fest, dass sich beim Silikonöl erst bei Spannungen von über 4500V Grießkornketten bildeten. Wir überlegten woran das liegen könnte. Uns fiel auf, dass das Silikonöl sehr schnell auseinander lief (wir hatten es auf eine Folie gekippt), was eben zur Folge hat, dass die Silikonölschicht dünner war als die Rizinusölschicht. Außerdem stellten wir fest, dass die Grießkörner im Silikonöl absinken, während sie auf dem Rizinusöl schwimmen. Das bedeutet, dass sich Grießkörner im Silikonöl schlechter bewegen lassen.



Der Grießkornversuch mit Silikonöl

Nach diesem Versuch kamen wir zum Grießkornversuch mit Rizinusöl zurück. Wir erkannten, dass das elektrische Feld an spitzen Elektroden am stärksten ist. Anhand dieser Ergebnisse entwarfen wir nun neue Elektroden, um die Viskosität vom ERFs besser messen zu können.



So hatten wir eine praktische und einfache Lösung gefunden.

Wie gut sich die ERF mit unseren neuen Elektroden verfestigt, zeigt die folgende Abbildung.



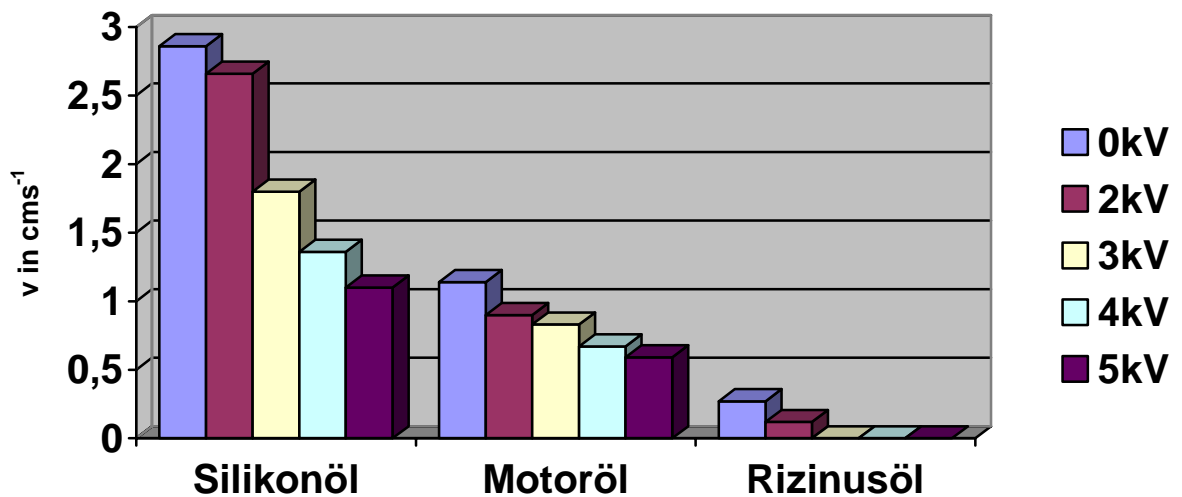
Demonstration der neuen Elektroden

Bei abgeschalteter Spannung senkte sich die Kugel in der ERF (Zeolithstaub in Rizinusöl) ab. Legten wir eine Hochspannung von 25kV an, war die ERF so fest, dass wir diese mit dem Glas zusammen anheben und beliebig lange in der Luft halten konnten.

### 5.3 Versuche mit 3 ERFs

Nun kamen wir zu den Versuchen mit den ERFs. Wir benutzten bei allen drei ERFs Zeolith als Staub. Wir nahmen 126g Zeolith und füllten es in drei Kölschgläser. Wir vermengten es mit je 65,3g Silikonöl und Motoröl. Wir hatten jedoch ein Problem mit dem Rizinusöl. Die Mischung war bei diesem Verhältnis schon zu Fest. Deshalb benutzten wir dort 98,1g Rizinusöl. Wir nahmen alle Versuche mit einer Kamera auf, da diese 25 Bilder pro Sekunde macht. So konnten wir exakt die Zeit bestimmen, die die Kugel braucht, um die ERF zu durchlaufen.

**Geschwindigkeit der Kugel in Abhängigkeit von der Ölsorte und der Spannung**



Bei dieser Messung sieht man, dass der Unterschied zwischen Spannung 0kV und Spannung 5kV bei Silikonöl am größten und Rizinusöl am kleinsten ist. Motoröl befindet sich dazwischen. D.h. wir können sagen, dass sich Silikonöl von den drei Ölen am besten als ERF eignet.

## 6. Ausblick

Unser Ziel war es, elektrorheologische Flüssigkeiten zu optimieren. Auf dem Weg dorthin gab es viele Stolpersteine, die wir jetzt überwunden haben. Das bedeutet wir können und werden an den Versuchen mit 3 ERFs anknüpfen und uns vordergründig mit den Messreihen befassen. Konkret heißt das, dass wir die Anzahl an Ölen und Stäube erweitern um umfassende Ergebnisse zu erhalten. So hoffen wir das Ziel, ein optimales Gemisch für die jeweils gewünschte Anwendung zu finden, zu erreichen.

## 7. Literaturliste

1. Metzler Physik  
*Schroedel Verlag*  
*Hrsg.: Grehn, Joachim; Krause, Joachim*
2. Spektrum der Wissenschaft – August 2003  
*„Flinke Flüssigkeiten“ Schröder, Tim ; Seite 74*
3. Trickkiste Physik  
*Wittman, Josef*  
*Bayerische Schulbuch-Verlag*
4. Praktikum der Physik  
*Teubner Verlag, Walcher, Wilhelm u. a. Praktikum der Physik*