

# Elektrorheologische Antriebseinheit für fluidische Applikationen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Ruben Garschagen

Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2019

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Andreas E. Guber
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jan G. Korvink
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jost Göttert









# Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas E. Guber für die Betreuung und Unterstützung während der Promotion.

Für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an der Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan G. Korvink und Prof. Dr.-Ing. Jost Göttert.

Bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT), die durch Beratung zu diversen Fragen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank geht an Herrn Dr. Ralf Ahrens und die weiteren Mitarbeitern der BioMEMS-Arbeitsgruppe für ihre Unterstützung. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Marc Schneider, Frau Alexandra Moritz und Herrn Marco Heiler für die Hilfe bei der Fertigung unterschiedlicher Bauteile bedanken.

Da die Arbeit von der Bürkert Werke GmbH initiiert und unterstützt wurde, geht ein weiterer Dank an deren Mitarbeiter. Dort insbesondere an alle Mitarbeiter des Bürkert Innovation Centers, die bei Fragen zu unterschiedlichen Fachbereichen von Elektrotechnik bis zur Simulation beratend unterstützt haben. Ein spezieller Dank gilt dabei Dr.-Ing. Peter Krippner, Dipl.-Phys. Michael Schupp und Dr. Thomas Hahn für Ideen und Anregungen in zahlreichen Projektbesprechungen.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern und Geschwistern, die während meiner Ausbildung bis zu Promotion stets hinter mir standen.

Vielen Dank.



# Zusammenfassung

In unserem Alltag nutzen wir an verschiedenen Stellen fluidtechnische Systeme. In der Industrie werden durch das Vermischen unterschiedlicher Flüssigkeiten und Gasen diverse Produkte hergestellt. In der Medizintechnik wird sie von der Forschung über die Diagnose bis zur Behandlung von Krankheiten eingesetzt. Auch nutzen wir die Hydraulik und Pneumatik, um Leistungen und Kräfte zu übertragen. Um einen Fluidstrom zu steuern und zu regeln, werden Ventile eingesetzt. Muss ein Fluid auf viele Leitungen geschaltet oder müssen mehrere Fluide geregelt werden, können die dazu notwendigen Ventile in einer Ventilmatrix zusammengefasst werden. Dies hat nicht nur einen geringeren Platzbedarf zur Folge, sondern reduziert auch das Volumen in den Leitungen zwischen den Ventilen. Die Flüssigkeitsmenge, welche sich in dem Volumen befindet, steht für eine weitere Nutzung nicht zur Verfügung. Daher ist dies insbesondere beim Händeln kleiner Flüssigkeitsvolumen von Vorteil.

In dieser Arbeit wird ein Antriebskonzept für eine Ventilmatrix untersucht, welches auf einer elektrorheologischen Flüssigkeit basiert. Eine elektrorheologische Flüssigkeit (ERF) ist eine Dispersion, welche meistens aus einer nichtleitenden Trägerflüssigkeit und kleinen Partikeln besteht. Im elektrischen Feld polarisieren sich die Partikel und die gegenseitigen Anziehungskräfte der Partikel wirken dem Fließen der Flüssigkeit entgegen. Makroskopisch betrachtet wird dadurch die Viskosität erhöht. In dem in dieser Arbeit betrachteten ERF-Aktor wird über das Anlegen eines elektrischen Feldes durch den elektrorheologischen Effekt der Fließwiderstand in einem Kanal erhöht und die dadurch hervorgerufene Druckänderung zum Schalten eines Ventils genutzt. Somit kann die Antriebseinheit, welche die Energie für das Betätigen des Ventils bereitstellt, zum Antrieb mehrerer Ventile verwendet und von diesen räumlich getrennt aufgebaut werden. Durch das Trennen der Funktionen sind für die angesteuerten Ventile nur wenige Elemente erforderlich, was einen einfachen Aufbau derselben ermöglicht. Das Konzept ist somit speziell auf die Ansteuerung mehrerer Ventile in einer Ventilmatrix ausgerichtet. Zur Umsetzung eines solchen Aktorprinzips wurde ein Konzept für eine Ventilmatrix entwickelt. Dabei lag der Fokus auf einer einfachen Fertigung der einzelnen Ventile, die sich auch für eine Herstellung in größeren Stückzahlen eignet. Anhand einer aufgebauten Testmatrix konnte die Funktionsfähigkeit des Antriebskonzepts demonstriert werden und eine Charakterisierung des Schaltverhaltens der Matrixventile erfolgen.



# Abstract

In our everyday life we use different fluidtechnical systems. In the industry are several products manufactured by mixing different fluids and gases. In medical technology they are used from the research to the diagnosis to the treatment of diseases. Also we are using hydraulic and pneumatic systems to transfer power and forces. Valves are used to control and regulate a fluid flow. If a fluid has to be distributed to many conduits, the necessary valves can be packet together in a valve-matrix. This results in a smaller required space and reduced volume in the conduits between the valves. The fluid in this volume can not be used for further processes. This is beneficial by handling small volumes of liquid.

This thesis is about an actor-concept for a valve-matrix which works with an electrorheological fluid. An electrorheological fluid is mostly a dispersion of a non conductive fluid with small particles. In an electric field the particles get polarized and the attracting forces between the particles work against the fluid flow. This results in a higher viscosity. The idea of this actor is that a channel gets blocked by the ER-effect when a voltage is applied. The resulting pressure increasing is used to operate a valve. Consequently the propulsion unit can be used for several valves and can be placed separatly. As a consequence only a few elements are necessary for a single valve. This enables a simple structure. Hence the concept is developed to operate multiple valves in a valve matrix. To implement this principle a concept for a valve matrix was developed. The focus has been a simple production which is suitable for high quantities. A test-matrix was produced. Therewith the function of the drive concept could be demonstrated and the switching behavior could be characterized.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Theoretische Grundlagen . . . . .	5
2.1.1 Fluidtechnik . . . . .	5
2.1.2 Elektrorheologische Flüssigkeiten . . . . .	10
2.1.3 Berechnung des elektrischen Feldes . . . . .	14
2.1.4 Methode der kleinsten Fehlerquadrate . . . . .	14
2.2 Mikrotechnische Herstellungsverfahren . . . . .	16
2.2.1 Vakuum-Heißprägen . . . . .	17
2.2.2 Sputtern . . . . .	20
2.2.3 Kleben . . . . .	20
2.2.4 Ultraschallschweißen . . . . .	23
<b>3 Stand der Forschung</b>	<b>27</b>
3.1 Ventile allgemein . . . . .	27
3.2 Ventilaktoren . . . . .	28
3.2.1 Elektromagnetischer Aktor . . . . .	29
3.2.2 Piezoelektrischer Aktor . . . . .	30
3.2.3 Aktoren auf der Basis von Formgedächtnislegierungen . . . . .	30
3.2.4 Elektrostatische Aktoren . . . . .	32
3.2.5 Pneumatische Aktoren . . . . .	33
3.2.6 Aktoren auf Basis von Phasenübergängen . . . . .	34
3.2.7 Zusammenfassung . . . . .	35
3.3 Elektrorheologische Aktoren . . . . .	36
<b>4 Charakterisierung des ERF-Schaltverhaltens</b>	<b>41</b>
4.1 Versuchsaufbau . . . . .	41
4.1.1 Testchip . . . . .	41

4.1.2	Versuchsstand . . . . .	46
4.2	Versuche . . . . .	50
4.2.1	Versuchsablauf . . . . .	50
4.2.2	Einfluss von Elektrodenabstand und Elektrodenlänge . . . . .	51
4.2.3	Temperatureinfluss . . . . .	55
4.2.4	Reaktionszeit . . . . .	55
4.2.5	Hysterese . . . . .	57
4.2.6	Weitere Beobachtungen . . . . .	59
4.3	Fazit . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Aufbau eines einzelnen Ventils</b>	<b>63</b>
5.1	Ventilkonzept . . . . .	63
5.2	Ventilaufbau . . . . .	64
5.3	Schaltverhalten eines Einzelventils . . . . .	65
5.4	Fazit . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Ventilmatrix</b>	<b>75</b>
6.1	Konzept . . . . .	75
6.2	Aufbau einer Testmatrix . . . . .	77
6.2.1	Mechanik und Fluidik . . . . .	77
6.2.2	Elektronische Schaltung zur Ansteuerung der Elektroden . . . . .	84
6.3	Versuche zum Schaltverhalten der Testmatrix . . . . .	85
6.3.1	Einfluss des Drucks auf das Schaltverhalten . . . . .	86
6.3.2	Elektrodenschaltung . . . . .	87
6.3.3	Spannung . . . . .	88
6.4	Optimierungen und Aufbau eines Ventilstapels . . . . .	91
6.4.1	Aufbau . . . . .	91
6.4.2	Fertigung Ventilebene . . . . .	95
6.4.3	Fertigung Verteilerplatten . . . . .	98
6.4.4	Stapel . . . . .	99
6.5	Fazit . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>103</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	103
7.2	Ausblick . . . . .	106
	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Anhang</b>	<b>XV</b>



# 1 Einleitung

Das Bewegen von Flüssigkeiten und Gasen hat in unserer technisch ausgerichteten Gesellschaft eine große Bedeutung. In der Lebensmittel- und Chemietechnik werden durch das Vermischen und Dosieren von Flüssigkeiten viele Produkte hergestellt, die wir in unserem Alltag nutzen. Das Übertragen von Leistung und Kräften über eine Flüssigkeit wird in hydraulischen Antrieben genutzt. Neben einer Pumpe und Leitungen werden Ventile verwendet, um einen Fluidstrom zu steuern und zu regeln. Je nach Anwendungen werden Schaltventile mit zwei Schaltzuständen (offen oder geschlossen) oder Regelventile (auch Stetig- oder Proportionalventil genannt) eingesetzt. Gerade in automatisierten Anlagen mit vielen Ventilen werden die Ventile nicht von Hand betätigt, sondern sollen auf ein externes Signal, wie eine elektrische Spannung von einer elektronischen Steuerung, reagieren. Dafür ist ein Aktor nötig, der das Ventil nach Signaleingang verstellt. Die wichtigsten Aktoren für Ventile sind die elektromagnetische und piezoelektrische Verstellung sowie eine fluidische, meist hydraulische oder pneumatische, Ansteuerung. Daneben werden noch weitere Aktoren eingesetzt, welche sich durch ihre diversen Vor- und Nachteile für unterschiedliche Aufgaben eines Ventils eignen. [1–3]

Eine Herausforderung stellt die Handhabung verschiedener Flüssigkeiten auf engstem Raum dar. Dies ist das Feld der Mikrofluidik. „Die Mikrofluidik beschäftigt sich mit der Handhabung von Flüssigkeiten und Gasen auf kleinstem und engstem Raum.“ [4] Ein weites Anwendungsfeld ist dabei die Medizintechnik. Dort stehen oft nur kleine Probenmengen zur Analyse zur Verfügung. In einem mikrofluidischen System ist es wichtig die einzelnen Komponenten mit möglichst wenig Volumen in den Leitungen dazwischen aufzubauen, damit dort nichts von dem Fluid verloren geht. In [5] wird dazu ein modularer Aufbau beschrieben, mit dem sich ein oder mehrere Fluide auf unterschiedliche mikrofluidische Chips verteilen lassen.

Kompakt aufgebaute fluidische Systeme bieten nicht nur bei der Handhabung kleiner Flüssigkeitsmengen Vorteile, sondern auch bei der Verarbeitung vieler verschiedener Flüssigkeiten. Bei der Analyse von Flüssigkeiten müssen diese zu verschiedenen Sensoren verteilt oder mit anderen Substanzen gemischt werden. Beispielsweise werden in der Flüssigchromatographie Proben mit einem Laufmittel (auch Eluent genannt) vermischt. In einer Trennsäule tren-

nen sich die einzelnen Substanzen der Probe auf und können anschließend mit einem oder mehreren Detektoren analysiert werden. [6] In Geräten, in denen mehrere Proben automatisiert analysiert werden sollen, müssen diese einzeln dosiert und mit einem von mehreren vorliegenden Laufmitteln vermischt werden. Um jeweils eine Probe mit einem bestimmten Laufmittel zu vermischen, werden viele Ventile benötigt. Diese können in einer Ventilmatrix oder Ventilinsel zusammen gefasst werden.

In [7] wird eine Ventilmatrix zur Messung von Stoffwechselfvorgängen in einer Mikrotiterplatte mit 48 Wells eingesetzt. Für jedes Well werden zwei Ventile verwendet, wodurch sich 96 Ventile pro Mikrotiterplatte (127,8 mm x 85,5 mm) ergeben. Die Ventile werden dabei pneumatisch angetrieben und öffnen alle gleichzeitig. In einer Ventilmatrix mit pneumatischem Aktor wird die Energie zum Schalten außerhalb der Ventilmatrix durch eine Druckluftversorgung bereitgestellt. Um ein Ventil in der Matrix zu schalten, wird die Druckluft über ein weiteres Ventil außerhalb der Matrix mit dem Ventil verbunden. So kann das eigentliche Ventil in der Matrix klein und einfach gestaltet werden. Für das Betätigen sind eine externe Druckluftversorgung und weitere Ventile, meist eins pro Matrixventil, zur Ansteuerung nötig. Der eingesparte Platz wird also in erster Linie verlagert. [3]

Mit der fluidischen Ansteuerung lässt sich eine kompakte Ventilansteuerung realisieren. Dabei ist es notwendig das Steuerfluid ebenfalls auf einem möglichst kleinem Raum zu steuern. Viele mikrofluidische Systeme arbeiten bei Umgebungsdruck oder knapp darüber. Zur Steuerung der Fluide können dort Kapillarkräfte und die Oberflächenspannung benutzt werden. Somit wird der Fluidstrom durch die Gestaltung der Kanäle bestimmt und es sind keine weiteren Komponenten zur Steuerung notwendig. [4] Zur Ansteuerung eines Ventils werden höhere Drücke benötigt, wodurch weitere Elemente, wie z. B. elektromagnetische Aktoren, zum Steuern erforderlich sind. Diese haben i. d. R. einen wesentlichen Einfluss auf den benötigten Bauraum. Hierdurch ergibt sich dort ein erhebliches Potential zur Verkleinerung des Gesamtaufbaus.

Im Gegensatz zu dem Fluid, welches man in der Ventilmatrix steuern möchte, ist das Fluid zum Betätigen des Aktors nicht von der Anwendung abhängig und kann frei gewählt werden. Eine spezielle Art von Fluiden, welche sich gut auf kleinem Raum steuern lassen, sind Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF). Diese können im elektrischen Feld makroskopisch betrachtet ihre rheologischen Eigenschaften verändern. Damit werden sie zu den sog. intelligenten Materialien (smart materials) gezählt. Sie bestehen in der Regel aus einer Trägerflüssigkeit und kleinen Partikeln. Wird die ERF einem elektrischen Feld ausgesetzt, polarisieren sich die Partikel und ziehen sich gegenseitig an. Dadurch wirkt der Partikelbewegung eine zusätzliche Kraft entgegen, die zu einer Erhöhung des Fließwiderstands führt. Somit

---

kann der Volumenstrom in einer Fluidleitung verringert oder gar gestoppt werden. Seit ihrer Entdeckung 1949 durch Winslow wurden verschiedene Anwendungen getestet. [8] Dies ist z. B. auf dem Gebiet der Medizintechnik der Fall. In [9] werden einige Konzepte, wie eine Knieorthese zur Rehabilitation mit ERF-Bremse, vorgestellt und in [10] geht es um die Entwicklung einer Force-Feedback-Einheit für die minimalinvasive Chirurgie. In [11] wird eine ERF-Kupplung beschrieben, in der durch den elektrorheologische Effekt (ER-Effekt) die Reibung zwischen den beiden Kupplungshälften eingestellt und diese somit verbunden oder getrennt werden können. Spezielle Stoßdämpfer können während des Betriebs durch den ER-Effekt verstellt werden. Über Sensoren können bestimmte Betriebsbedingungen, wie z. B. der Fahrbelag, überwacht werden. Ändern sich die Betriebsbedingungen, kann der Stoßdämpfer daran angepasst werden. [12, 13].

In dieser Arbeit wird ein alternatives Ventilmatrixkonzept vorgestellt, welches für unterschiedlichste Anwendungen verwendet werden kann. In diesem soll der elektrorheologische Effekt genutzt werden, um ein einfaches Ventil aufzubauen, welches sich gut in einer Matrixanordnung integrieren lässt. In dem Konzept wird die Energie für alle Ventile in einer Matrix durch eine Pumpe bereitgestellt, welche eine elektrorheologische Flüssigkeit (ERF) zu den einzelnen Ventilen fördert. Dadurch entfällt bei einem einzelnen Ventil ein kompletter Aktor. Somit lässt sich ein einzelnes Ventil einfacher gestalten. Im Gegensatz zur pneumatischen Ansteuerung muss dort jedoch nicht ein weiteres komplettes Ventil eingesetzt werden, um ein einzelnes Ventil in der Matrix zu schalten. Um die ERF zu steuern sind lediglich Elektroden in den Leitungen notwendig. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an diesen lässt sich der Fluss der ERF steuern und somit die einzelnen Ventile betätigen.

Das grundlegende Konzept für ein einzelnes Ventil mit elektrorheologischem Aktor, welches dieser Arbeit zu Grunde liegt, ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die ERF wird durch einen Kanal gepumpt, der durch eine Membran von dem Ventilsitz getrennt ist. Durch das Anlegen einer Spannung an den Elektroden im Kanal, wird dieser durch den ER-Effekt gesperrt. Da die ERF nicht mehr weiterfließen kann, drückt sie die Membran auf den Ventilsitz und verschließt diesen für das zu schaltende Medium. Wird die Spannung weggenommen, kann die ERF wieder fließen, der Druck baut sich ab und die Membran kehrt in den Ausgangszustand zurück.

Das Ziel dieser Arbeit ist die prinzipielle Machbarkeit der Ventilidee anhand eines einzelnen Ventils zu überprüfen und mögliche Vor- und Nachteile einer damit aufgebauten Ventilmatrix zu identifizieren. In Kapitel 2 wird auf die relevantesten in diese Arbeit verwendeten theoretischen Grundlagen und Technologien eingegangen. In Kapitel 3 wird ein Überblick über bestehende Technologien zur Ansteuerung von Ventilen und ERF-Aktoren gegeben. Vor

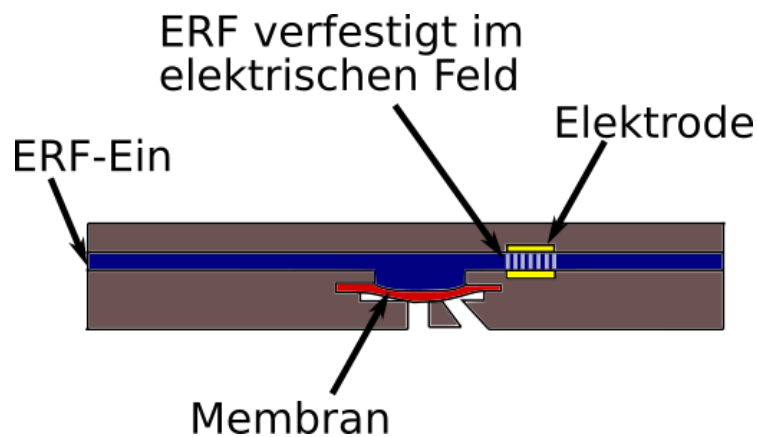


Abb. 1.1: Prinzipskizze der Ventilidee: Wird der Kanal durch den elektrorheologischen Effekt gesperrt, drückt die ERF die Membran auf den Ventilsitz.

dem Aufbau einer Ventilmatrix wurden zuerst Vorversuche zur Charakterisierung des ERF-Schaltverhaltens durchgeführt. Diese sollten den Entwicklungsvorgang der Ventile unterstützen. Neben einigen Eigenschaften, welche für die Entwicklung und Auslegung eines Aktors interessant sind, lag der Fokus auf dem Sperren eines Kanals durch den elektrorheologischen Effekt. Auf die Vorversuche wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Im Anschluss wird in Kapitel 5 ein aufgebautes Ventil und die damit durchgeführten Versuche vorgestellt. Darauf folgt in Kapitel 6 die Beschreibung eines Konzepts zur Umsetzung einer Ventilmatrix. Anhand eines vereinfachten Aufbaus konnte die Herstellung und Funktion getestet und verschiedene Betriebssituationen und -strategien miteinander verglichen werden. Im letzten Kapitel folgt eine Diskussion der Ergebnisse anhand einer Zusammenfassung und eines Ausblicks.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Theoretische Grundlagen

#### 2.1.1 Fluidtechnik

##### Rheologie

Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Fließverhalten von verschiedenen Materialien. Eine wichtige Größe ist hierbei die Viskosität ( $\eta$ ). Dieser Materialparameter beschreibt den Zusammenhang zwischen einer von Außen aufgebracht Last und der daraus resultierenden Scher- bzw. Fließgeschwindigkeit. Um dies anschaulich darzustellen, kann das Zweiplattenmodell verwendet werden. Dies ist in der Skizze in Abbildung 2.1 dargestellt. Hierbei befindet sich das Material zwischen zwei parallelen Platten mit der Fläche  $A$  und dem Abstand  $h$ . Die untere Platte steht fest und die obere bewegt sich durch die Kraft  $F$  mit der Geschwindigkeit  $v$  in  $x$ -Richtung. Die dynamische Viskosität ( $\eta$ ) als Materialparameter beschreibt den Zusammenhang zwischen der Schubspannung ( $\tau$ ) und der Schergeschwindigkeit ( $\dot{\gamma}$ ) (Formel 2.1). [14]

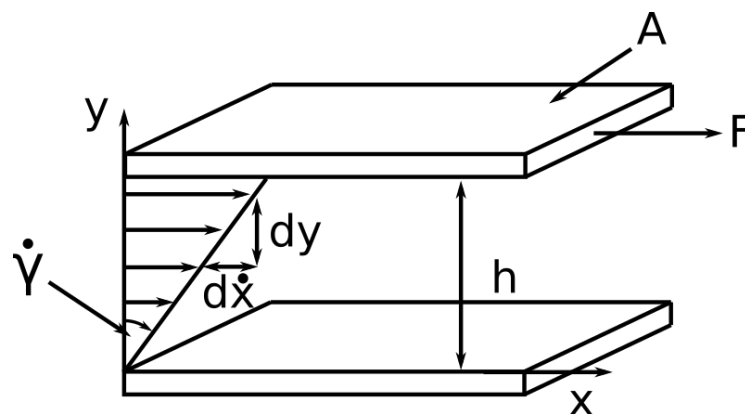


Abb. 2.1: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit zwischen zwei parallel bewegten Platten.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{d\dot{x}}{dy} \quad (\text{Newtonsches Fluid}) \quad (2.1)$$

Die Viskosität kann nicht direkt gemessen werden und muss aus anderen Messgrößen berechnet werden. Dazu werden Rheometer verwendet. Ein häufig genutzter Vertreter ist das Plattenrheometer, welches dem oben gezeigten Zweiplattenmodell sehr ähnlich ist. Die zu untersuchende Probe befindet sich zwischen zwei Platten, welche durch eine Rotationsbewegung zueinander bewegt werden. Dabei wird entweder im Kriechversuch die Kraft oder im Spannversuch die Geschwindigkeit kontinuierlich oder schwingend vorgegeben und die jeweils andere Größe gemessen. Die Schubspannung und die Schergeschwindigkeit lassen sich aus den geometrischen Randbedingungen, der Kraft und der Geschwindigkeit berechnen (Formeln 2.2 und 2.3). Somit lässt sich dann mit der Formel 2.4 auch die Viskosität berechnen. [14]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\dot{x}}{dy} = \frac{v}{h} \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{Fh}{vA} \quad (2.4)$$

Verhält sich ein Material nach der Formel 2.1 und ist die Viskosität konstant, spricht man von einem Newtonschen Fluid. Für viele Materialien, welche ein komplexeres Verhalten aufweisen, reicht dieses Modell nicht zur Beschreibung aus. Eine elektrorheologische Flüssigkeit im elektrischen Feld und viele andere Materialien fangen erst zu fließen an, wenn eine bestimmte Schubspannung (Fließgrenze ( $\tau_F$ )) überschritten wird (s. Kapitel 2.1.2). Diese können durch das Bingham-Modell (s. Abb. 2.2 und Formel 2.5) beschrieben werden. [15] Des Weiteren gibt es noch diverse andere rheologische Modelle, wie z. B. eine Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit oder der Zeit, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll. [14]

$$\tau = \tau_F + \eta\dot{\gamma} \quad (\text{Bingham Fluid}) \quad (2.5)$$

### Strömungsmechanik / Berechnung

Zur Auslegung eines fluidtechnischen Systems ist von Interesse, bei welcher Druckdifferenz in einem Kanal sich welcher Volumenstrom einstellt. Dafür wird zunächst ermittelt, ob es sich um eine laminare oder turbulente Strömung handelt. Hierzu wird die Reynoldszahl als

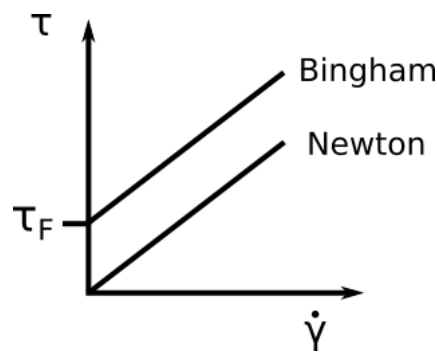


Abb. 2.2: Qualitativer Verlauf der Schubspannung über der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche rheologische Modellfluide.

Indikator verwendet. Sie ist eine dimensionslose Kennzahl und setzt innerhalb eines Fluids die Trägheitskraft in das Verhältnis zur Reibungskraft (2.6). Hierbei ist  $v$  die Geschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $\eta$  die dynamische Viskosität des Fluides. Der Parameter  $l$  beschreibt dabei eine charakteristische Länge. Bei einem kreisförmigen Strömungsquerschnitt ist dies der Durchmesser. Bei anderen Formen, wie einem Rechteckkanal, kann hier der hydraulische Durchmesser ( $d_H$ ) verwendet werden (2.7). Dieser setzt den Strömungsquerschnitt ( $A$ ) ins Verhältnis zum Umfang ( $U$ ). Ist die Reynoldszahl kleiner als 2300, liegt eine laminare Strömung vor. Ist sie größer, ist die Strömung turbulent. Aus der Formel für die Reynoldszahl lässt sich erkennen, dass die Größe des Strömungskanals einen großen Einfluss hat. Bei kleinen Strömungskanälen ist der Anteil der Reibungskräfte größer und es liegt meistens eine laminare Strömungen vor. [16]

$$Re = \frac{vpl}{\eta} \propto \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} \quad (2.6)$$

$$d_H = \frac{4A}{U} \quad (2.7)$$

Im laminaren Fall müssen keine Turbulenzen berücksichtigt werden. Das hat den Vorteil, dass sich mit Hilfe der dynamischen Viskosität der Volumenstrom durch einen Kanal bei einer vorgegebenen Druckdifferenz einfacher berechnen lässt. Dabei wird das Fluid in lamina-re Schichten zerlegt. Die dynamische Viskosität gibt die Änderung der Schergeschwindigkeit bei einer bestimmten Schubspannung an. Damit lässt sich die Geschwindigkeitsdifferenz der einzelnen Schichten berechnen. Mit einer Randbedingung ergeben sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Schichten, die über den Querschnitt aufsummiert den Volumenstrom ( $Q$ ) ergibt. Dies ist hier anhand eines Strömungskanals mit rundem Querschnitt gezeigt (2.8). Als Randbedingung wird dabei eine Wandhaftung des Fluids angenommen, d.h. die Fließ-

geschwindigkeit am Rand ist null. Werden Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Querschnittsfläche integriert, erhält man den Volumenstrom (2.9). So kann auch für einzelne Bauteile oder Baugruppen ein hydraulischer Widerstand berechnet werden (2.10). Mit Formel 2.9 ergibt sich dann Formel 2.11 für den hydraulischen Widerstand eines kreisförmigen Querschnitts. [2]

$$v(y) = \frac{\Delta p}{\eta l} \int_y^r \frac{\pi y^2}{2\pi y} dy = \frac{\Delta p}{4\eta l} (r^2 - y^2) \quad (2.8)$$

$$Q = \int_0^r v(y) \cdot 2\pi y dy = \frac{\pi r^4}{8\eta l} (p_1 - p_2) \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\Delta p}{Q} \quad (2.10)$$

$$R_{rund} = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad (2.11)$$

Für einen runden Querschnitt lässt sich der Volumenstrom auf diese Weise gut berechnen. Für einen rechteckigen Querschnitt, welcher in der Mikrofluidik häufig vorkommt, lässt sich eine derartige Formel nicht exakt lösen. Wenn der Kanal sehr viel breiter ist als die Höhe, kann man die Seiten vernachlässigen und analog zum runden Querschnitt vorgehen. Somit erhält man für einen schmalen Spalt eine gute Näherung. [2] Für Kanalstrukturen, bei denen die Höhe  $h$  des Kanals nicht sehr viel kleiner als die Breite  $b$  ist (s. Abb. 2.3), wurde in [17] mittels einer Fouriertransformation eine Formel hergeleitet (2.12).

$$Q = \frac{h^3 b \Delta p}{12\eta L} \left[ 1 - \sum_{n, odd}^{\infty} \frac{192h}{n^5 \pi^5 b} \tanh\left(n\pi \frac{b}{2h}\right) \right] \quad (2.12)$$

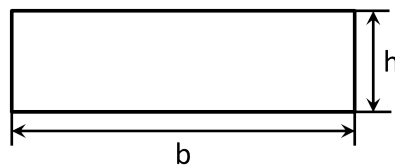


Abb. 2.3: Rechteckkanal

## Mikrofluidik

In dieser Arbeit wird ein Antriebskonzept mit typischen mikrofluidischen Abmessungen entwickelt (s. Kapitel 1). Grundsätzlich verhält sich ein mikrofluidisches System und seine Komponenten genauso wie ein makrofluidisches System. Allerdings haben dort aufgrund der kleineren Abmaße einige physikalische Gesetze einen größeren Einfluss, während andere eine geringere Rolle spielen. Dies macht sich vor allem durch das Verhältnis von Oberflächen- zu Volumenkräften bemerkbar (s. Formel 2.13). Z. B. sind in der makroskopischen Fluidtechnik die Kapillarkräfte nur von untergeordneter Bedeutung. In der Mikrofluidik nutzt man den Effekt in einigen Fällen gezielt, um ein Fluid zu bewegen und braucht somit keine Pumpe. Dies wird in der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Fertigung genutzt. Durch die kleinen Dimensionen sind die Strömungen in der Regel laminar (s. Kapitel 2.1.1). Ein Nachteil, der sich daraus ergibt, ist die schlechte Durchmischung unterschiedlicher Substanzen. Daher ist es in der Mikrofluidik notwendig, relativ aufwändige Mischer-Strukturen zu verwenden. Auch der hydraulische Widerstand ist, wie in Formel 2.9 zu erkennen, bei kleineren Abmessungen deutlich höher. Ein Überblick über den Einfluss der Größe eines fluidtechnischen Systems auf verschiedene physikalische Größen ist in Tabelle 2.1 gegeben. Anwendung findet die Mikrofluidik vor allem dort, wo kleine Flüssigkeitsmengen transportiert, dosiert oder analysiert werden müssen. Dies ist z. B. in der Bio- oder Medizintechnik der Fall. Dort stehen, z. B. zur Analyse, oft nur kleine Probenmengen zur Verfügung. Durch das Verwenden von kleinen Probenmengen können diese schneller vollständig reagieren. [4, 17]

$$\frac{\text{Oberflächenkräfte}}{\text{Volumenkräfte}} \propto \frac{l^2}{l^3} = l^{-1} \xrightarrow{l \rightarrow 0} \infty \quad (2.13)$$

Physikalische Größe	Einfluss von $l$
Fläche	$l^2$
Volumen	$l^3$
Reynolds Zahl (Re)	$l^2$
Diffusionszeit	$l^2$
Hydraulischer Widerstand	$l^{-4}$
Kapillare Steighöhe	$l^{-1}$
Kapillargeschwindigkeit	$l^1$

Tabelle 2.1: Einfluss der charakteristischen Größe  $l$  eines fluidischen Systems auf verschiedene physikalische Größen. Auszug aus [17].

### 2.1.2 Elektrorheologische Flüssigkeiten

Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF) gehören zu den intelligenten Materialien (smart materials). Ihre besondere Eigenschaft ist, dass sie im elektrischen Feld makroskopisch betrachtet ihre rheologischen Eigenschaften verändern können. Sie bestehen aus einer nichtleitenden Flüssigkeit und kleinen Partikeln. Befinden sich die Partikel in einem elektrischen Feld, polarisieren sich diese. Die Folge ist, dass sich die Partikel gegenseitig anziehen. Dies kann dazu führen, dass sich die Partikel aneinander reihen und Ketten entlang der elektrischen Feldlinien bilden (s. Abb. 2.4). [18]

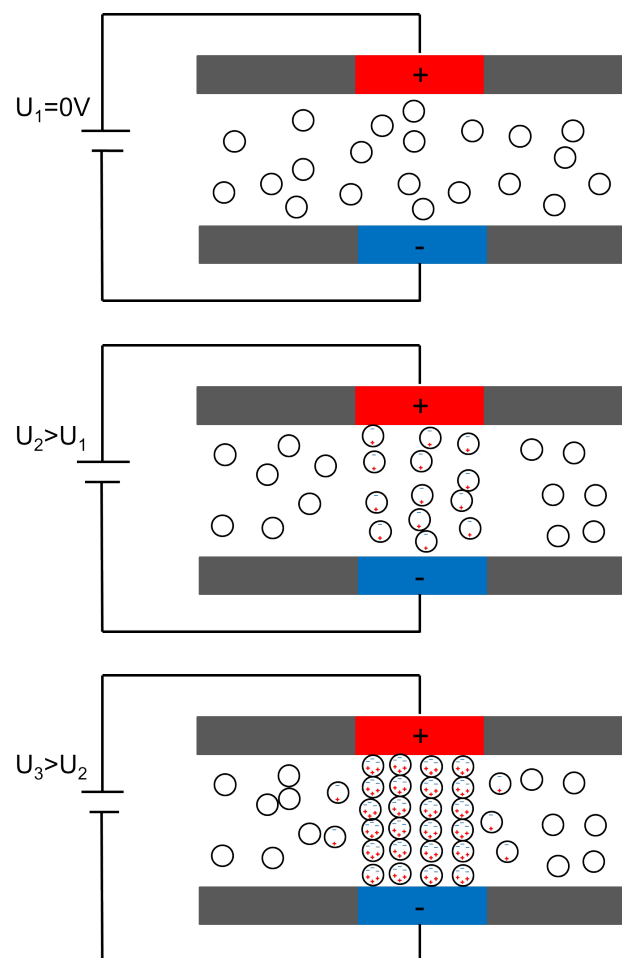


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des ER-Effekts: In einem elektrischen Feld polarisieren sich die Partikel in der ERF und ziehen sich gegenseitig an. Bei größeren Feldstärken werden die Partikel stärker polarisiert und die Anziehungskräfte sind größer. Die Partikel finden sich zu Strukturen entlang der Feldlinien zusammen.

Sodann wirkt dem Fließen der ERF neben den Strömungskräften im Fluid und der normalen Reibung zwischen den Partikeln noch die Anziehungskraft der Partikel entgegen. Dies kann makroskopisch gesehen durch das Entstehen einer Fließgrenze beschrieben werden (s. Abb. 2.5). Wird stattdessen die Viskosität erhöht, spricht man vom elektroviskosen Effekt. Der elektrorheologische Effekt (ER-Effekt) tritt innerhalb kürzester Zeit ein und ist bei Wegnahme des elektrischen Feldes reversibel. Die Stärke des Effekts steigt mit dem angelegten elektrischen Feld. Wie in Abb. 2.4 angedeutet, finden sich die Partikel zu Ketten zusammen. Dies ist in der Aufnahme in Abbildung 2.6 zu sehen. [19] Wenn zusätzlich noch eine mechanische Belastung auf die ERF ausgeübt wird, können diese Ketten sich in übergeordneten Strukturen anordnen. So werden z. B. in [20] lamellenförmige Strukturen beschrieben, welche sich unter einer Scherbeanspruchung herausbilden. [8, 15, 18, 19, 21]

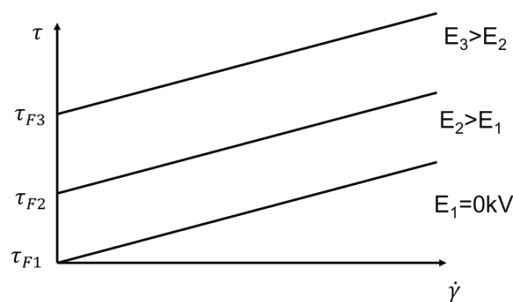


Abb. 2.5: Auswirkung des E-Felds auf die Fließgrenze einer ERF.

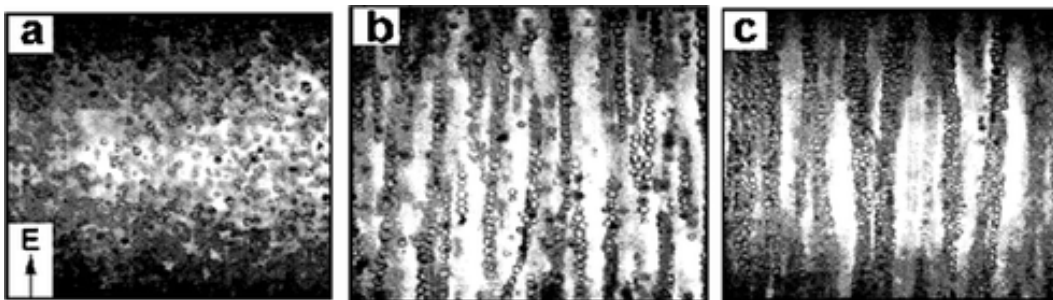


Abb. 2.6: Aufnahme der Partikel im E-Feld. Verwendet wurde ein ER-Fluid mit Partikeln aus Glas mit einem Durchmesser von  $1,5 \mu\text{m}$  in Silikonöl. (a) kein E-Feld; (b) E-Feld:  $500 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ ; (c) E-Feld:  $900 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ . [19]

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene ERFs entwickelt und getestet. Dabei kamen sowohl für das Fluid, als auch für die Partikel unterschiedliche Materialien zum Einsatz. In [22] werden über 30 verschiedene getestete Materialkombinationen aufgelistet. Für das Fluid sind vor allem die elektrischen Isolationseigenschaften entscheidend. Damit für einen großen ER-Effekt ein angelegtes elektrisches Feld möglichst hoch sein kann, muss sowohl der elektrische

Widerstand, als auch die elektrische Durchschlagsfestigkeit der Flüssigkeit groß sein. Wünschenswert ist weiterhin eine niedrige Viskosität, da diese maßgeblich die Viskosität der ERF ohne den Einfluss eines E-Feldes bestimmt. Aufgrund dieser Anforderungen sind Öle (vor allem Silikonöl) weit verbreitet. Die Partikel bestehen oft aus einer Kombination verschiedener Materialien. Dabei werden für die Herstellung sowohl organische als auch anorganische Materialien verwendet. Viele Partikel bestehen aus einem Kern, welcher mit einem zweiten Material beschichtet ist. In [23] werden ca. 80 nm große Partikel mit einem Kern aus  $BaTiO(C_2O_4)_2$  und mit einer 5-10 nm dicken äußeren Schicht aus Harnstoff ( $NH_2CONH_2$ ) beschrieben (s. Abb. 2.7). In [24] werden zwei ERFs beschrieben, deren Partikel aus Polyurethan bestehen, welches mit  $LiCl$  bzw.  $ZnCl_2$  dotiert wurde. Als Fluid wurde Silikonöl verwendet. Diese ERF zeichnet sich durch geringe Sedimentation und eine geringe Abrasion aus. Die Partikel der meisten ERFs haben eine Größe von 0,1 - 50  $\mu m$  und einen Volumenanteil von 5-50%. ERFs sind Dispersionen, wobei es neben den oben beschriebenen heterogenen noch homogene elektrorheologische Fluide gibt. Statt der Partikel liegt bei ihnen die zweite Komponente ebenfalls als flüssige Phase vor. Diese haben jedoch einen geringeren ER-Effekt [22] und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. [22,23,25]

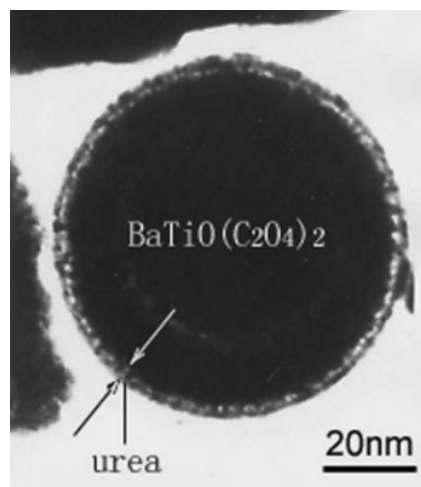


Abb. 2.7: TEM-Aufnahme von mit Harnstoff ( $NH_2CONH_2$ ) beschichteten Partikel aus  $BaTiO(C_2O_4)_2$ . [23]

Die Stärke des ER-Effekts hängt auch von der Temperatur ab. Dies liegt zum einen an der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstante der Partikel. Zum anderen wird durch eine erhöhte Temperatur die Brownsche Bewegung der Partikel erhöht [22]. In der Regel kommt es dadurch zu einer Erhöhung des ER-Effekts mit steigender Temperatur. In [26] wurden verschiedene ERFs hinsichtlich des Temperaturverhaltens untersucht. Dabei konnte für bestimmte ERFs eine optimale Temperatur gefunden werden, bei der der ER-Effekt ein Maximum erreicht. [22,26]



In der Literatur lassen sich unterschiedliche Ansätze finden, um den ER-Effekt mathematisch zu beschreiben. Dabei lassen sich zwei Arten von Ansätzen unterscheiden. Ein Weg sind Modelle, um die Polarisation und die daraus folgende Anziehungskraft der Partikel zu beschreiben. Da der Aufbau und somit auch die Polarisationsmechanismen der Partikel sehr verschieden sein können, gibt es auch verschiedene Ansätze zu deren Berechnung. Wu et al. haben ein Berechnungsmodell für die Anziehungskräfte vorgestellt, welches auf den unterschiedlichen Leitfähigkeiten beruht. [27,28] In Arbeiten, wie [29], wurde die Interaktion der Partikel simuliert. Mittels einer Molekulardynamik Simulation wurden hier Barium Titanoxid ( $BaTiO(C_2O_4)_2$ ) Partikel mit einer Harnstoffbeschichtung ( $NH_2CONH_2$ ) in einem Silikonöl simuliert. In Abbildung 2.8 sind links die Moleküle zu sehen. In dem rechten Bild sind bei ausgegrauten Molekülen die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Harnstoffmolekülen als gelbe Linien dargestellt. Der zweite Ansatz ist es, die Veränderung der Viskosität in Abhängigkeit des E-Feldes zu berechnen. Dabei wird als Basis eine Modifikation des Bingham-Modells (s. Formel 2.5) verwendet. In Arbeiten, welche diesen Ansatz nutzen, wird die Fließgrenze nicht als eine Konstante angesehen, sondern ist von weiteren Parametern abhängig, wie der Schergeschwindigkeit, dem elektrischen Feld oder geometrischen Randbedingungen (2.14). [18,30,31]

$$\tau_{ERF} = \tau_{ER}(E, \dot{\gamma}, l, \dots) + \eta \dot{\gamma} \quad (2.14)$$

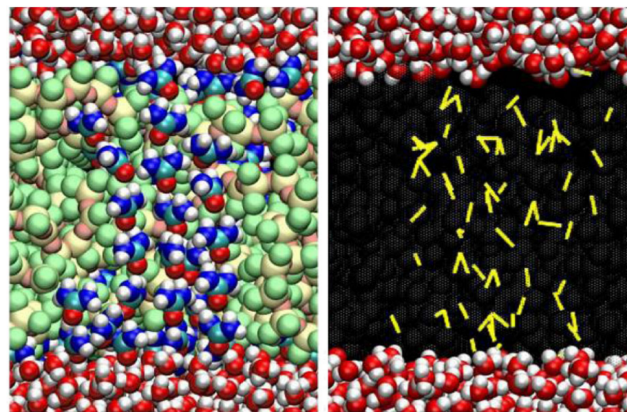


Abb. 2.8: Simulation der Interaktion von mit Harnstoff beschichteten Partikeln in Silikonöl im elektrischen Feld auf Molekülebene. Links: Darstellung der Moleküle, Rechts: Darstellung der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Harnstoffmolekülen (gelbe Linien). [29]

### 2.1.3 Berechnung des elektrischen Feldes

Wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist die Größe des elektrischen Feldes (E-Feld) für die Stärke des ER-Effekts entscheidend. Dieses wird über die Änderung des elektrischen Potentials berechnet (2.15). Für einfache geometrische Fälle lässt sich dies nach Formel 2.16 vereinfachen. Liegen zwischen zwei definierten Potentialen mehrere Schichten aus unterschiedlichen Materialien (s. Abbildung 2.9), so verteilt sich das E-Feld nicht gleichmäßig. Für die Stärke des E-Feldes in den einzelnen Schichten sind die jeweiligen dielektrischen Eigenschaften verantwortlich. Zur Beschreibung wird die Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_r$ ) verwendet. Diese ist ein dimensionsloser Materialparameter und bei den meisten Materialien konstant. Um beispielsweise das E-Feld in der zweiten Schicht zu berechnen, kann Formel 2.17 verwendet werden. [34] Das Beispiel kann auf einen ERF-Kanal (mittlerer Bereich mit  $\epsilon_{r2}$ ) und eine isolierende Schicht (äußeren Bereiche mit  $\epsilon_{r1}$  und  $\epsilon_{r3}$ ) an den Kanalwänden übertragen werden. Durch die äußeren Schichten wird die elektrische Feldstärke im mittleren Bereich verringert.

$$E = -grad(\varphi) \quad (2.15)$$

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l} \quad (2.16)$$

$$E_2 = \frac{U}{l_2 + \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}l_1 + \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r3}}l_3} \quad (2.17)$$

### 2.1.4 Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Für den in dieser Arbeit geplanten Ventilaufbau wird eine Beziehung zwischen angelegter elektrischer Spannung und Schließverhalten unter Berücksichtigung der wichtigsten Einflussparameter aufgestellt (s. Kapitel 4.2). Diese Beziehung soll auch für vorher nicht vermessene Aufbauten hinreichend genau gelten und aus Messpunkten experimentell validiert werden. Für eine möglichst genaue Berechnung werden viele Messpunkte einbezogen, welche die Anzahl der Unbekannten deutlich übersteigt. Um die Abweichung zwischen den berechneten Werten und den Ergebnissen aus den Versuchen möglichst gering zu halten, wird dort die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. „Die Estimationstheorie beschäftigt sich mit der Schätzung interessierender Größen aus verfügbaren Beobachtungen“ [35]. Dies können Konstanten in einer Gleichung sein, welche durch Messungen zu bestimmen sind. Liegen mehrere Messpunkte vor, kann der Einfluss von Messfehlern reduziert werden (s. Abb. 2.10). Dazu stehen unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Die am weitesten verbreitete Methode ist die der kleinsten Fehlerquadrate. Hier werden die Parameter so bestimmt, dass die

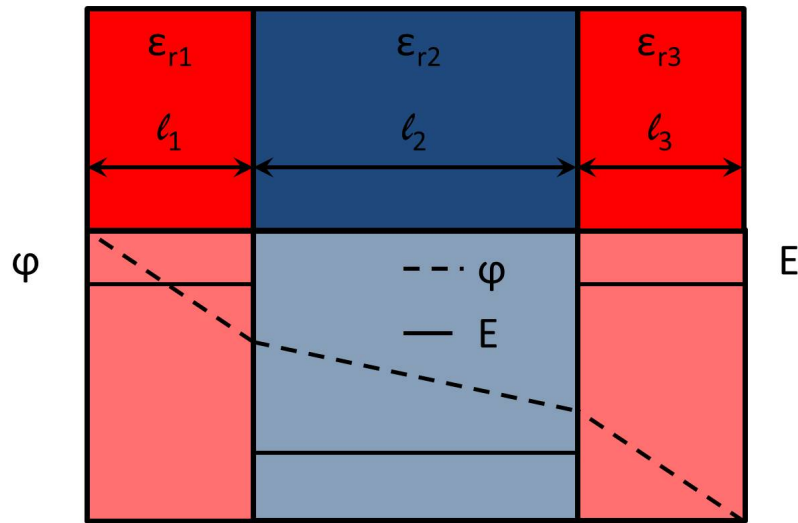


Abb. 2.9: Qualitativer Verlauf des E-Feldes ( $E$ ) und des elektrischen Potentials ( $\varphi$ ) bei mehreren Materialschichten mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten ( $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} < \epsilon_{r2}$ ).

Summe der Abweichungen zu den einzelnen Messpunkten im Quadrat am geringsten ist. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei den Größen, die in die Berechnung einfließen, um Messwerte handelt. Diese sind nie exakt, sondern immer mit einer Unsicherheit behaftet. Dies wird im Folgenden durch ein „ $\hat{\phantom{x}}$ “ über den Formelsymbolen gekennzeichnet. Hat man eine Gleichungsform gewählt, z. B. eine Gerade 2.18, wird diese in eine bestimmte Form nach Formel 2.19 gebracht. Die Gleichung besteht aus einem Vektor  $\hat{Y}$  mit den gemessenen Werten, der Beobachtungsmatrix  $H$  mit den Messpunkten und dem Parametervektor  $\hat{U}$  mit den gesuchten Parametern. Aus der Messabweichung nach Formel 2.20 kann das Gütekriterium der kleinsten Fehlerquadrate nach Formel 2.21 aufgestellt werden. Um das Minimum zu ermitteln, wird die erste Ableitung gebildet und gleich Null gesetzt (Formel 2.22). Aufgelöst nach der Parametermatrix  $H$  (Formel 2.23) können die einzelnen Parameter berechnet werden. Die Matrix  $(H^T H)^{-1} H^T$  wird als Pseudoinverse bezeichnet. [35]

$$\hat{y} = a_1 \hat{x} + a_0 \quad (2.18)$$

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{y}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix} a_1 + a_0 = \begin{pmatrix} \hat{x}_1 & 1 \\ \hat{x}_2 & 1 \\ \hat{x}_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_0 \end{pmatrix} = H \hat{U} \quad (2.19)$$

$$\hat{e} = \hat{x} - H \hat{U} \quad (2.20)$$

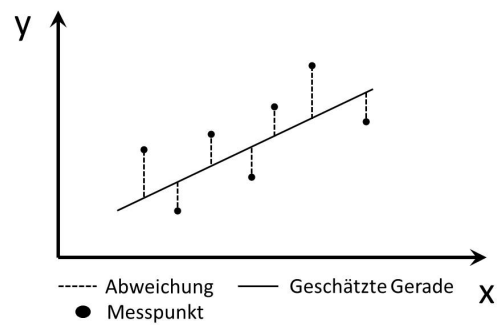


Abb. 2.10: Messwerte und geschätzte Gerade.

$$J = \hat{\epsilon}^T \hat{\epsilon} = \hat{Y}^T \hat{Y} - 2\hat{Y}^T H \hat{U} + \hat{U}^T H^T H \hat{U} \rightarrow \min \quad (2.21)$$

$$\Rightarrow \frac{dJ}{dU} = -2H^T \hat{Y} + 2H^T H \hat{U} = 0 \quad (2.22)$$

$$\hat{U} = (H^T H)^{-1} H^T \hat{Y} \quad (2.23)$$

## 2.2 Mikrotechnische Herstellungsverfahren

Nachdem im ersten Teil dieses Kapitels die wichtigsten theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargestellt wurden, wird im folgenden zweiten Teil auf die wichtigsten verwendeten Herstellungsverfahren eingegangen. Die Fertigung der in den Kapiteln 4 bis 6 vorgestellten Aktoren umfasst im Wesentlichen drei Schritte. Der erste Schritt ist die Herstellung der fluidischen Strukturen in einer Platte. Als nächstes werden Elektroden hinzugefügt und anschließend erfolgt die Verbindung mit einer Deckelplatte (s. Abb. 2.11). Um die elektrischen Spannungen möglichst gering zu halten und eine kleine Baugröße der Ventilmatrix zu erreichen, sollten die Kanäle für die ERF klein ausfallen. Daher müssen sich die Fertigungsverfahren auch für Strukturen  $< 1$  mm eignen.

Entscheidend für die Wahl geeigneter Herstellungsverfahren ist die Materialauswahl. Im Grundkörper der Ventilmatrix befinden sich die Kanäle und die Elektroden, an denen hohe elektrische Spannungen angelegt werden. Daraus ergibt sich als Materialanforderung eine gute elektrische Isolationseigenschaft. Polymere weisen diese Eigenschaft auf und lassen

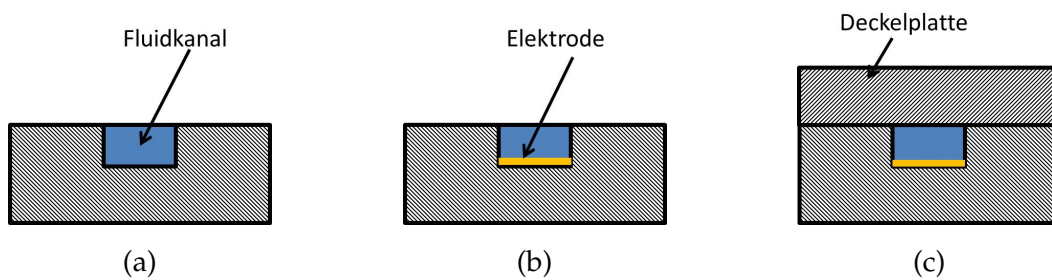


Abb. 2.11: Schematische Übersicht der wesentlichen Fertigungsschritte. Die fluidischen Strukturen werden in eine Platte eingebracht (a) und nach dem Hinzufügen einer Elektrode (b) mit einer zweiten Platte verbunden (c).

sich zudem gut mit geringen Kosten verarbeiten. Mit der Arbeit wird die Entwicklung einer Ventilmatrix angestrebt, die sich gut in großen Stückzahlen herstellen lässt. Durch die Wahl thermoplastischer Polymere können diese durch Umformen auch in größerer Stückzahl präzise und schnell verarbeitet werden. Zur Massenfertigung von Kunststoffbauteilen bietet sich das Spritzgießen an. Weil dazu relativ aufwändige Gussformen notwendig sind und sich deren Herstellung erst für sehr große Stückzahlen lohnt, wurde in dieser Arbeit das Vakuum-Heißprägen verwendet. Hier sind die notwendigen Formeinsätze weniger aufwändig und es lassen sich auch kleine Strukturen gut abformen. Eine schnelle und zuverlässige Verbindungstechnik ist das Ultraschallschweißen. Damit lassen sich thermoplastische Kunststoffe stoffschlüssig miteinander verbinden. Ein weiteres wichtiges Fügeverfahren in dieser Arbeit ist das Kleben. Dabei ist der Aufwand bei der Fertigung der Bauteile weniger groß als beim Ultraschallschweißen und es lassen sich auch unterschiedliche Materialtypen miteinander verbinden.

### 2.2.1 Vakuum-Heißprägen

Das Heißprägen gehört zur Gruppe der Urformverfahren. Dabei wird ein Werkstoff erwärmt und in eine Form gepresst. Der Unterschied zum Gießen besteht darin, dass das Material nicht bis in den flüssigen Zustand erwärmt, sondern nur soweit erhitzt wird, bis es weich ist und sich verformen lässt. Die Form besteht meistens aus zwei Platten. In eine ist die abzuformende Struktur eingebracht und wird Formeinsatz oder Abformwerkzeug genannt. Die andere ist in der Regel eine Platte ohne spezielle Struktur. Durch diesen Aufbau sind die Abformwerkzeuge einfacher und daher auch schneller und kostengünstiger gefertigt als z. B. Spritzgusswerkzeuge. Dafür ist die Abformzeit beim Vakuumheißprägen deutlich länger. Der Prozess findet in der Regel im Vakuum statt. So wird verhindert, dass Gase, wie die Umgebungsluft, eingepreßt werden. Der Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 2.13 und der Temperatur- und Kraftverlauf in Abbildung 2.12 dargestellt. Zwischen die beiden Platten

wird der zu formende Werkstoff eingebracht. Dieser kann als Platten- oder Folienmaterial oder in loser Form als Pulver oder Granulat vorliegen. Im ersten Schritt werden die beiden Platten zusammengefahren bis eine definierte Anpresskraft ( $F_A$ ) erreicht ist. Anschließend wird die Luft aus der Kammer evakuiert und der Aufwärmvorgang wird gestartet. Bei Polymeren liegt die Umformtemperatur ( $T_U$ ) oberhalb der Vikat-Erweichungstemperatur. Ist diese erreicht, werden die beiden Platten kraftgesteuert zusammengefahren. So wird der Werkstoff in die Form gepresst. Nach einer Haltezeit werden im dritten Schritt die Platten auf die Entformtemperatur ( $T_E$ ) gekühlt, bei der Werkstoff wieder fest ist. Die Prägekraft ( $F_P$ ) wird dabei aufrecht gehalten. Anschließend beginnt der letzte Schritt, das Entformen. Die beiden Platten werden wieder auseinander gefahren und das Werkstück kann entnommen werden. Die Schrumpfung durch das Abkühlen nach dem Formvorgang macht sich an zwei Stellen bemerkbar. Zum einen werden die Endabmaße des Bauteils verändert. Zum anderen wird der Entformvorgang beeinflusst, da der Kunststoff des Bauteils einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten hat, als das Metall des Formeinsatzes. Damit sich die Bauteile besser entformen lassen, kann die Gegenplatte eine sandgestrahlte Oberfläche haben. Damit haftet das Werkstück besser auf dieser und kann mit einer höheren Kraft aus dem Formeinsatz gezogen werden. Soll die Oberfläche glatt sein, z. B. damit diese transparent ist, kann auch mit einer polierten Oberflächen entformt werden. Um den Entformvorgang zu verbessern ist es in jedem Fall sinnvoll, mit Entformschrägen zu arbeiten. [36]

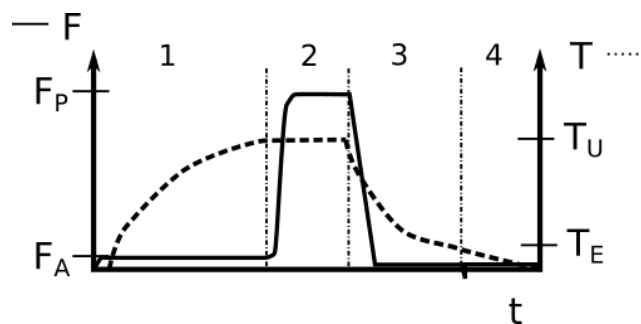


Abb. 2.12: Qualitativer Verlauf von Temperatur und Kraft während des Heißprägevorgangs. Nach dem Einlegen des Halbzeugs und dem Aufbringen einer Anpresskraft ( $F_A$ ) wird auf die Umformtemperatur ( $T_U$ ) geheizt (1). Ist diese erreicht, wird die Prägekraft ( $F_P$ ) aufgebracht (2). Nach einer Haltezeit wird bis zur Entformtemperatur ( $T_E$ ) gekühlt (3) und anschließend entformt (4).

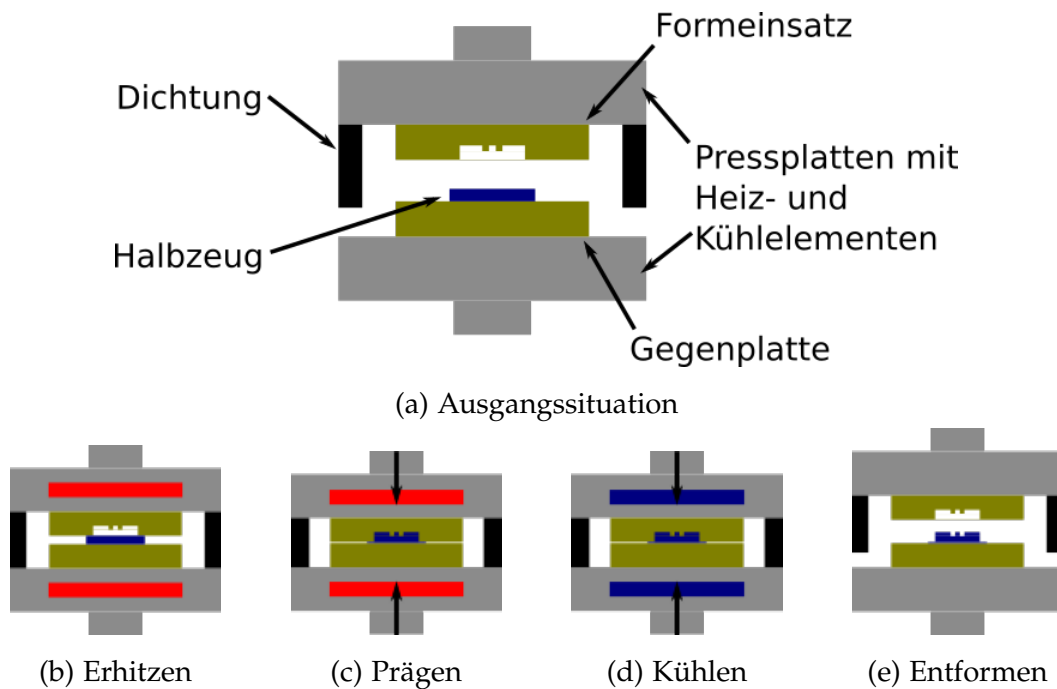


Abb. 2.13: Schematische Darstellung des Heißprägens. (a) Der zu formende Werkstoff wird zwischen den Formeinsatz und die Gegenplatte gelegt. (b) Der Aufbau wird zusammengefahren, die Kammer evakuiert und anschließend erwärmt. (c) Nach Erreichen der Umformtemperatur ( $T_U$ ) erfolgt das Zusammendrücken der beiden Platten mit einer definierten Kraft, wodurch der Werkstoff in die Form gelangt. (d) Der Aufbau wird gekühlt, bis der Werkstoff wieder fest ist. (e) Entformen des Bauteils, indem die Platten auseinandergefahren werden.

### 2.2.2 Sputtern

Das Sputtern (Kathodenzerstäuben) gehört zu den PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition). Bei diesem Verfahren wird das Werkstück (Substrat) und der aufzubringende Werkstoff (Target) einige Zentimeter voneinander entfernt in einer Kammer platziert. Aus dieser wird die Luft evakuiert und anschließend Argon als Prozessgas eingelassen. Dabei bleibt ein Unterdruck im System erhalten. Anschließend wird eine Spannung zwischen Target und dem Substrat angelegt, wodurch es zu einer Plasmaentladung kommt. Die Argonionen werden gegen das Target geschleudert und brechen dort Atome und Molekülstücke heraus, welche auf das Substrat gelangen und dort haften bleiben. Da die Moleküle mit den Atomen des Prozessgases kollidieren, treffen diese aus unterschiedlichen Winkeln auf die Substratoberfläche. Durch die hohe kinetische Energie beim Aufprall wird eine gute Haftfestigkeit erreicht. Als Target können dabei sowohl reine Materialien als auch Legierungen verwendet werden. Mit der Menge an Gas, der Stromstärke, der Dauer und dem Abstand zwischen Substrat und Target lassen sich die Schichtdicke sowie die Qualität beeinflussen. So können sehr feine Schichten von einigen wenigen bis einigen hundert *nm* erzeugt werden. [37,38]

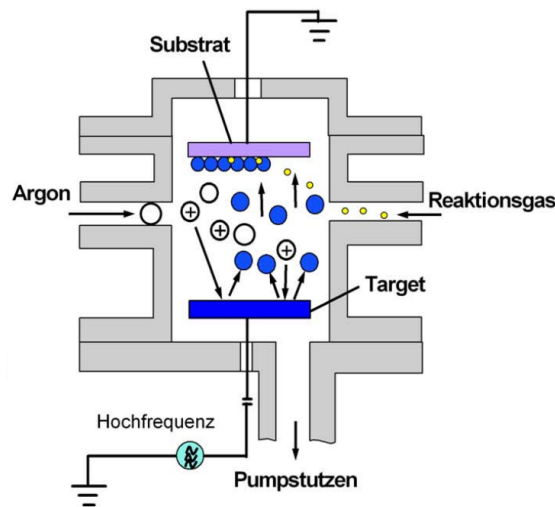


Abb. 2.14: Die Argonionen werden vom Target angezogen und brechen dort beim Aufprall Atome bzw. Moleküle heraus. Diese gelangen auf das Substrat und bleiben dort haften. [37]

### 2.2.3 Kleben

Das Kleben ist ein weit verbreitetes Fügeverfahren und bietet den Vorteil, dass viele verschiedene Werkstoffe stoffschlüssig miteinander verbunden werden können. Bei der Aushärtung und der Verbindung zwischen Klebstoff und Bauteil werden unterschiedliche physikalische



und chemische Bindungsmechanismen genutzt. Nachteilig ist das Verwenden eines weiteren Materials. Dies kann zu Problemen führen, wenn der Klebstoff sich nicht mit den Umgebungsbedingungen verträgt. In der Fluidtechnik muss daher auf die Verträglichkeit zwischen Klebstoff und dem Medium, welches mit dem Klebstoff in Berührung kommt, geachtet werden. Einige Klebstoffe erfüllen neben der Verbindung von Bauteilen noch weitere Aufgaben. Leitfähige Klebstoffe können elektrische Kontakte herstellen oder die Wärmeübertragung verbessern. Dies wird durch das Beimischen von leitfähigen Partikeln erreicht. Häufig wird dabei Silber, Gold, Kupfer oder Kohlenstoff verwendet. [4, 39, 40]

### **Verbindung**

Bei der Festigkeit wird zwischen der Verbindung zwischen Klebstoff und Bauteil (Adhäsion) und der Festigkeit des Klebstoffes (Kohäsion) unterschieden. Die schwächere der beiden Kräfte limitiert die Festigkeit der Verbindung. Die Kohäsionskräfte werden durch den gewählten Klebstoff bestimmt. Die Adhäsionskräfte hängen von der Werkstoffkombination zwischen Klebstoff und dem zu fügenden Bauteil ab. Adhäsionskräfte können von weniger festen physikalischen Bindungen, wie permanente oder induzierte Dipole, bis zu hochfesten chemischen Bindungen, wie kovalenten oder ionischen Bindungen, reichen. Um diese Verbindungen zu erzielen, ist es notwendig, dass die Oberflächen der Fügestellen sauber sind. Eine raue oder poröse Oberfläche kann die Adhäsion verbessern, da der Klebstoff sich so zusätzlich mechanisch mit dem Bauteil verbinden kann. [39, 40]

### **Aushärtung**

Klebstoffe werden im Allgemeinen im flüssigen Zustand aufgetragen und härten dann aus. Eine Ausnahme bilden Haftklebstoffe, welche hier jedoch nicht weiter betrachtet werden. Der Übergang von flüssig zu fest kann sowohl durch physikalische Vorgänge, wie Trocknen oder Abkühlen aus der Schmelze, als auch durch chemische Reaktionen erfolgen. Bei Zweikomponentigen Klebstoffen beginnt die Polymerisation beim Vermischen der beiden Komponenten. Bei einkomponentigen Klebstoffen sind alle benötigten Reaktionspartner schon vermischt. Um die Aushärtung auszulösen, werden verschiedene Mechanismen verwendet. Dies kann etwa durch das Verdampfen von Lösemittel oder durch Strahlung, wie UV-Licht, geschehen. Die Art der Aushärtung hat auch eine Auswirkung auf die Lagerung. Hier ist darauf zu achten, dass die Klebstoffe keinen Bedingungen ausgesetzt sind, welche die Aushärtung auslösen. Das heißt, die Klebstoffe müssen je nach Art gekühlt, vor Licht geschützt oder luftdicht verpackt sein. Da Zweikomponentenklebstoffe erst bei Vermischung der Komponenten aushärten, sind diese oft länger haltbar. Durch eine erhöhte Temperatur kann die Aushärtung oft

beschleunigt und auch die Endfestigkeit beeinflusst werden. [39,40]

### Klebevorgang

Für das Aufbringen eines Klebstoffes gibt es viele Verfahren. In dieser Arbeit sind das Kammerkleben und das Kapillarkleben die wichtigsten. Beim Kammerkleben wird der Klebstoff in eine Aussparung im Werkstück, meist eine umlaufende Nut in der Fügezone, eingefüllt. Werden beide Fügepartner zusammengepresst, werden diese an der Kammer verbunden. Das Kapillarkleben wird verwendet, um den Klebstoff zwischen zwei Platten zu verteilen, ohne dass dieser z. B. in einen angrenzenden Kanal gelangt. Dazu wird ein Klebstoff mit einer geringen Viskosität verwendet. Dieser wird an einer oder mehreren Stellen in die Fügezone gegeben und fließt durch die Kapillarkräfte zwischen den Bauteilen entlang. Kommt der Klebstoff an eine Kante im Bauteil, wie z. B. einen Kanal, wird der Klebstoff nicht mehr von den Kapillarkräften gezogen und stoppt. Der Klebstoff fließt solange, bis die Fügezone vollständig benetzt ist (s. Abb. 2.15). Sehr wichtig ist hierbei, dass die Kante exakt gefertigt ist, da schon kleine Fehler das Einfließen des Klebstoffs in den Kanal begünstigen. [4,16,39,40]

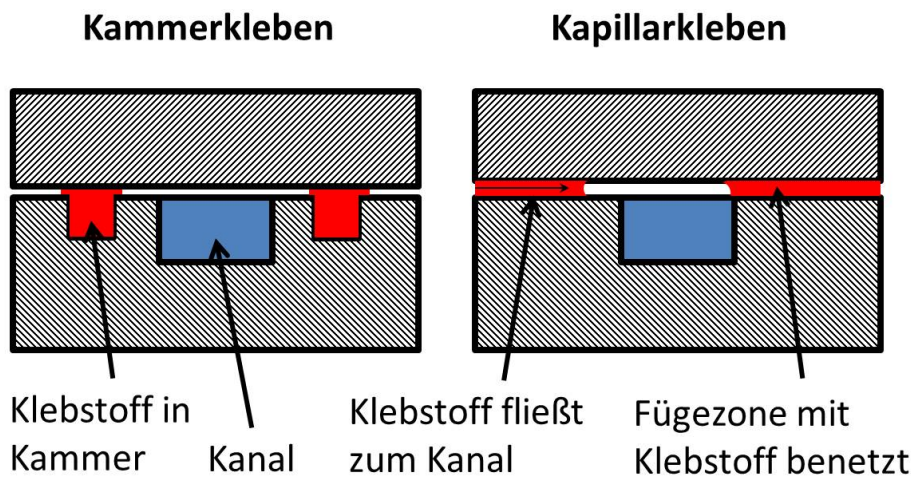


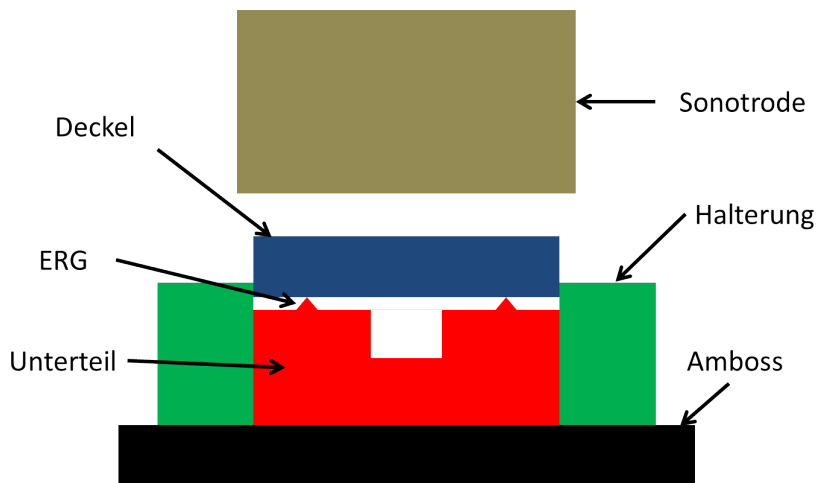
Abb. 2.15: Schematische Darstellung des Kammer- und Kapillarklebens. Beim Kammerkleben (links) wird der Klebstoff in eine dafür vorgesehene Vertiefung (Kammer) gegeben. Beim Kapillarkleben (rechts) wird ein niedrigviskoser Klebstoff in den Spalt zwischen Unterteil und Deckel gegeben und fließt dann durch die Kapillarkräfte bis zum Kanal.

### 2.2.4 Ultraschallschweißen

Dieses Verfahren nutzt Schwingungen im Ultraschallbereich, um die Fügebauteile aufzuschmelzen. Das Prinzip ist in der Abbildung 2.16 dargestellt. Die zu fügenden Bauteile werden aufeinander gelegt und von der Ultraschallschweißmaschine zusammengepresst. In das Werkstück werden Schwingungen im Ultraschallbereich eingebracht. So entsteht durch Reibung an der Fügefläche zwischen den Bauteilen Wärme und kann durch die Verwendung von Energierichtungsgebern verstärkt werden. Ist die eingekoppelte Energie hoch genug, fangen die Bauteile an zu schmelzen. Wird keine weitere Energie mehr eingekoppelt, erstarrt die Schmelze wieder und die Bauteile sind miteinander verbunden. Damit die Bauteile gezielt an der Fügefläche aufschmelzen und nicht unkontrolliert erweichen, werden sogenannte Energierichtungsgeber (ERG) an einem der zu fügenden Bauteile angebracht. Dies sind meist dünne Stege, welche idealerweise spitz zulaufen. Dadurch ist die Kontaktfläche am Anfang sehr gering und die Energie konzentriert sich auf diese kleinere Fläche. Somit legt der Energierichtungsgeber im Vorfeld den Verlauf der Schweißnaht fest. [41,42]

Der Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Im Konverter wird mit einem Piezo elektrische Energie in mechanische umgewandelt und so die Schwingung erzeugt. Diese wird an den Booster weitergeleitet, welcher die Amplitude verändert. Über die Sonotrode wird die Schwingung dann auf die Bauteile übertragen. Booster und Sonotrode können für unterschiedliche Schweißvorgänge ausgetauscht werden. Durch die Auslegung der beiden Bauteile kann die Amplitude am Werkstück eingestellt werden. Die gesamte Einheit aus Generator, Booster und Sonotrode wird zum Schweißen nach unten auf die Bauteile gedrückt. Diese sind auf dem Amboss in oft speziell auf das Bauteil zugeschnittenen Halterungen fixiert. Dies ist notwendig, da die Bauteile sich sonst durch die Schwingung während des Schweißvorgangs bewegen. [41,43]

Beim Ultraschallschweißen (USS) entsteht in weniger als einer Sekunde eine feste Verbindung zwischen den Fügepartnern. Dass keine Zusatzstoffe eingebracht werden, ist ein weiterer Vorteil. Die Fertigung des ERG stellt einen Nachteil des Verfahrens dar. Auch das Verschweißen ohne ERG ist möglich. Dann liegt der Mehraufwand jedoch an einer anderen Stelle. Mit einer Sonotrode, welche eine strukturierte Unterseite aufweist, können dünne Bauteile, wie Folien, verschweißt werden. Dies wird z. B. beim Verschweißen von Lebensmittelverpackungen verwendet. Durch das vorherige Erwärmen der Fügebauteile ist das flächige Verschweißen von Platten möglich [45]. Auch ist es möglich, mit diesem Verfahren Strukturen in ein Bauteil einzuprägen [46,47]. [42,43]



(a) Die Fügeteile werden in eine auf dem Amboss fest montierte Halterung gelegt.

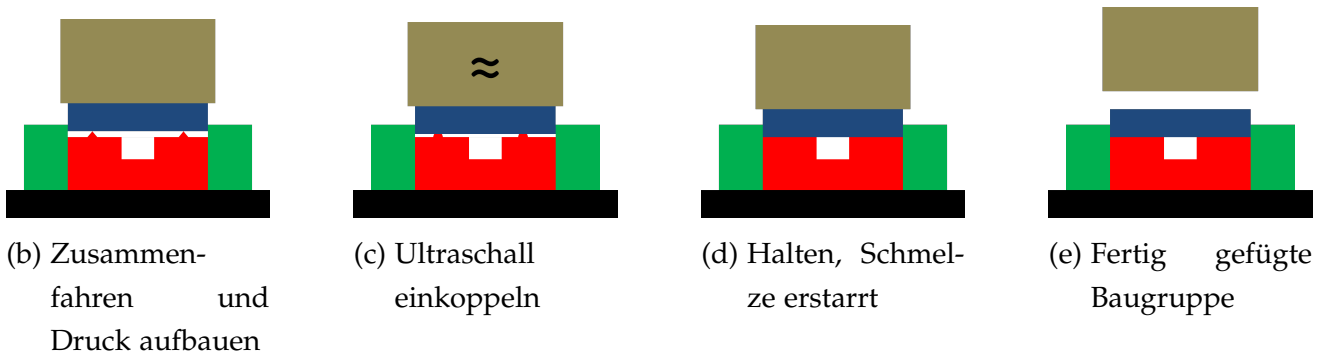


Abb. 2.16: Schematische Darstellung des Ultraschallschweißvorgangs: (a): Ausgangssituation. (b)-(e): Ablauf Ultraschallschweißen; Die Fügepartner werden zwischen Sonotrode und Amboss zusammengedrückt. Die Halterung sorgt für eine genaue Platzierung und verhindert ein Verrutschen beim Schweißvorgang. Durch das Einkoppeln der Ultraschallenergie schmilzt der Energierichtungsgeber (ERG). Nach dem Erstarren sind beide Fügepartner fest miteinander verbunden.

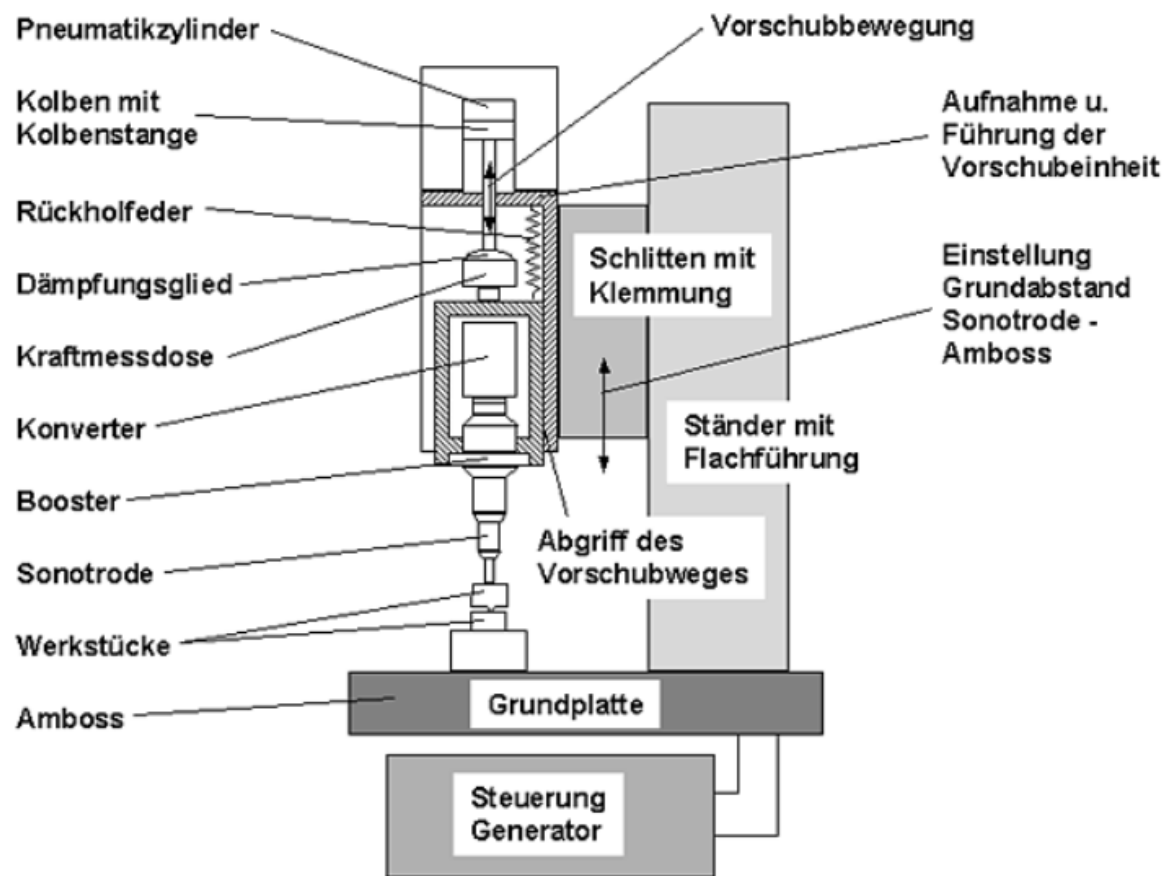


Abb. 2.17: Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine [44]



# 3 Stand der Forschung

## 3.1 Ventile allgemein

Die Einsatzgebiete von Ventilen und somit auch die Anforderungen an diese sind sehr unterschiedlich. Daher wurden im Laufe der Zeit viele verschiedene Arten von Ventilen entwickelt. Allgemein können Ventile nach folgenden Kriterien [2,49] unterteilt werden:

Die Aufgaben eines Ventils können sehr verschieden sein, z. B.:

- Regelung von Druck oder Volumenstrom
- Fluidfluss umlenken
- Sicherung gegen Überdruck
- Rückflusssperre.

Hinsichtlich ihres Aufbaus werden Ventile bezüglich des Steuer- bzw. Schließelements nach der Wirkfläche und der Wirkbewegung eingeteilt. Bei der Wirkfläche sind die wichtigsten Bauarten die Schieber- und Sitzventile. Der Unterschied ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Sitzventile bestehen aus zwei Teilen, dem Ventilsitz mit mindestens einer Öffnung für das Fluid und einem beweglichen Element, welches diese verschließen kann. Das bewegliche Element kann unterschiedlicher Art sein, wie z. B. ein Zylinder mit einem Kegel an einem Ende, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Diese Bauart besitzt eine ausgezeichnete Dichtigkeit im geschlossenen Zustand. Bei einem Schieberventil wird hingegen ein bewegliches Element in einem Gehäuse verschoben. Dabei werden je nach Stellung dieses Elements die Ein- und Ausgänge des Ventils miteinander verbunden oder voneinander getrennt. So lassen sich große Volumenströme auf kleinem Bauraum beherrschen und komplexe Schaltungen einfacher realisieren als mit einem Sitzventil. Die Wirkbewegung kann eine Längs- oder eine Drehbewegung sein.

Die Verstellung kann entweder diskret oder kontinuierlich erfolgen. Diskrete Ventile schalten zwischen zwei oder mehr fixen Schaltstellungen hin und her. Eine Einsatzmöglichkeit ist das Schalten eines Fluides auf verschiedene Ausgänge. Kontinuierlich verstellbare Ventile können proportional zu einem Eingangssignal auch in Zwischenzustände gestellt werden. Mit

ihnen lassen sich Regelungsaufgaben, wie z. B. eine Druckregelung, realisieren.

Die Zahl der gesteuerten Anschlüsse gibt an, wie viele Ein- und Ausgänge ein Ventil besitzt. Bei zwei Anschlüssen (2-Wegeventil) kann entweder schaltend oder proportional zwischen den beiden Schaltzuständen auf- und zugeschaltet werden. Bei Mehrwegeventilen lassen sich viele, teilweise komplexe Verschaltungen mehrerer Anschlüsse realisieren.

Die Ansteuerung der Ventile kann mechanisch (manuel, Federkraft, etc.), elektrisch (elektromagnetisch, piezoelektrisch, etc.) oder fluidisch (pneumatisch, hydraulisch) geschehen. Auf einige Aktortypen wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.



Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines Sitz- (a) und eines Drehschieberventils (b). Das Gehäuse ist jeweils grau, das bewegliche Element rot und der Raum für das geschaltete Fluid blau eingefärbt.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Ventilen ist ihre Stellung in unbetätigtem Zustand, wenn dem Ventilaktor keine Energie zugeführt wird. Dies ist nicht nur entscheidend bei einem Ausfall des Aktors, sondern auch für die zugeführte Leistung. In den Fällen wird auch von normally open- oder normally closed-Ventilen gesprochen. Eine Besonderheit stellen Einbauventile oder auch Cartridge-Ventile dar. Sie erfüllen verschiedene Schaltfunktionen und werden in standardisierte Bohrungen eingesetzt, statt an Rohren oder flexiblen Leitungen angeschlossen zu werden. In einem Block mit mehreren solcher Ventile können so ohne großen Entwicklungsaufwand komplexe Schaltungen realisiert werden. [1,2,49]

## 3.2 Ventilaktoren

Da es in dieser Arbeit in erster Linie um die Entwicklung des Ventilaktors geht, soll in diesem Unterkapitel eine kleine Übersicht über einige Aktoren gegeben werden, wie sie bei Ventilen für einen Nenndurchmesser von einigen hundert  $\mu\text{m}$  bis wenigen mm verwendet



werden. Wichtige Eigenschaften sind neben der weiter oben schon erwähnten Baugröße auch die Kraft, der Hub, die Reaktionszeit und die Komplexität. Ein weiteres Merkmal einiger Aktoren ist, dass diese nicht nur zwei Schaltzustände haben, sondern sich auch proportional zu einem Eingangssignal verstellen lassen. Die Eigenschaften der einzelnen Aktoren hängen sowohl stark von ihrem jeweiligen physikalischen Wirkprinzip als auch oft von der jeweiligen Ausführung ab.

### 3.2.1 Elektromagnetischer Aktor

Die elektromagnetische Ansteuerung ist bei Ventilen ein weit verbreitetes Aktorprinzip. In einer Spule wird durch Strom ein Magnetfeld erzeugt. Dadurch wird eine Kraft auf ein Teil einer beweglichen Baugruppe ausgeübt, durch deren Bewegung das Ventil geöffnet oder geschlossen wird. Es gibt dabei viele verschiedene Ausführungsformen. Eine Möglichkeit ist in Abbildung 3.2 veranschaulicht. Wie zu erkennen, sind die Spule und ein Magnet fest im Gehäuse verbaut. Eine Feder hält das Ventil im stromlosen Zustand geschlossen. Fließt ein Strom durch die Spule, bewegt sich der Stößel nach oben und öffnet das Ventil. Sobald der Strom abgeschaltet wird, wird das Ventil durch die Feder wieder geschlossen. Mit elektromagnetisch angesteuerten Ventilen lassen sich kurze Schaltzeiten und proportionale Ansteuerungen realisieren. Ein Nachteil dieses Aktors ist, dass durch die Spule in mindestens einem Schaltzustand immer Strom fließen muss. Dies führt zu einer oft nicht unerheblichen Wärmeentwicklung, wodurch sich auch das Medium, welches durch das Ventil fließt, stark erwärmen kann. Bei größeren Ventilblöcken kann die Wärmeabfuhr so zu einem Problem werden. [2,34,49]

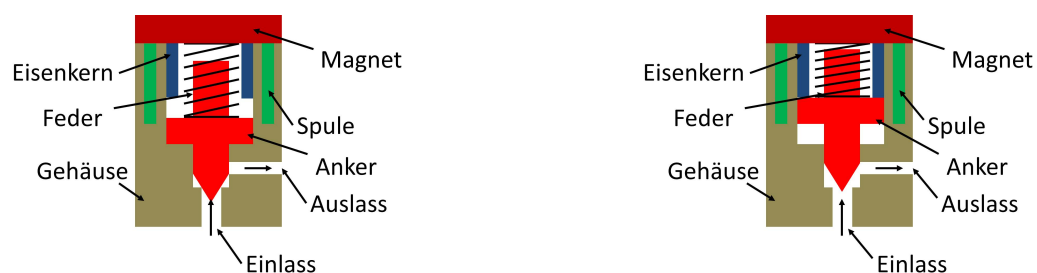


Abb. 3.2: Prinzip einer möglichen Ausführungsform eines elektromagnetischen Ventiltriebs. Links: Stromlos geschlossen. Rechts: Bestromt offen.

### 3.2.2 Piezoelektrischer Aktor

Piezoaktive Materialien verformen sich, wenn sie einem starken elektrischen Feld ausgesetzt sind. In Abbildung 3.3 ist eine Möglichkeit eines Ventilaktors analog zu dem in Abbildung 3.2 mit piezoelektrischen Antrieb dargestellt. Wird eine elektrische Spannung an ein piezoaktives Material angelegt, verformt sich dieses und das Ventil öffnet. Die durch den piezoelektrischen Effekt erzeugte Materialausdehnung ist sehr gering, welche allerdings mit einer hohen Kraft erfolgt. Um den Weg zu erhöhen, können weitere Elemente zur Kraft-Weg-Übersetzung, wie ein Hebel, eingesetzt werden. Um die benötigten elektrischen Spannungen möglichst gering zu halten, können mehrere Piezoschichten zu einem Stapel zusammengefasst werden. Dabei werden zwischen die einzelnen Schichten Elektroden zur Kontaktierung eingefügt. Solche Stapelaktoren können mit einer niedrigeren elektrischen Spannung den gleichen Hub erreichen als ein einzelner Aktor gleicher Größe. Ein weiterer Vorteil der Technologie ist die kurze Reaktionszeit. In [50] wird ein Mikroventil mit einer Schaltzeit von 0,7 ms vorgestellt. [21,50,51]



Abb. 3.3: Skizze eines piezoelektrisch angetriebenen Sitzventils. Links: Ohne elektrische Spannung ist das Ventil geschlossen. Rechts: Ist eine Spannung an den Piezo angelegt, wird dieses geöffnet.

### 3.2.3 Aktoren auf der Basis von Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnismaterialien sind spezielle Legierungen (FGL), die sich an eine vorher eingeprägte Form „erinnern“ können und durch Aktivierung in diese zurück verformen. Am weitesten verbreitet sind Nickel-Titan-Legierungen. Bei einer bestimmten Temperatur ( $T_U$ ) verändert sich die Gitterstruktur von einer Martensit- ( $T < T_U$ ) in eine Austenitphase ( $T > T_U$ ). Dabei können drei Arten von Formgedächtniseffekten auftreten: der Einweg-, Zweiweg- oder Pseudoelastische Effekt. Für Ventilanwendungen wird meistens der Einwegeffekt genutzt, da dieser größere Verstellwege und Kräfte ermöglicht. Hier wird dem Material eine Form eingeprägt. In der Niedertemperaturphase (Martensit) lässt sich dieses dann pseudoplastisch verformen. Wird das Material soweit erhitzt, dass sich das Martensit in Austenit verwandelt, „erinnert“ sich das Material an die zuvor eingeprägte Form und verformt sich zurück

(s. Abb. 3.4a). Eine Möglichkeit, dies als Aktor zu nutzen, ist in der Niedertemperaturphase z. B. eine Feder aus einem FGL-Material in die eine Richtung zu verformen. Wird diese dann z. B. durch elektrischen Strom erwärmt, zieht sich die Feder zurück (s. Abb. 3.4b). Ein Vorteil von FGL-Aktoren ist eine hohe Leistungsdichte. Die Reaktionszeiten werden durch das Aufheizen und das Abkühlen des Aktorelements bestimmt. Dabei ist auch ein materialbedingter Hystereseeffekt zu beachten. Wie man dies als Ventilaktor umsetzen kann, ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Hier sind zwei Federn verbaut, wobei die obere aus einem FGL-Material besteht und beispielsweise elektrisch erwärmt werden kann. Ohne Strom zieht die untere Rückstellfeder an dem Stößel und schließt das Ventil. Wird die FGL-Feder ausreichend durch elektrischen Strom erwärmt, zieht diese sich zusammen und öffnet das Ventil. [52,53]

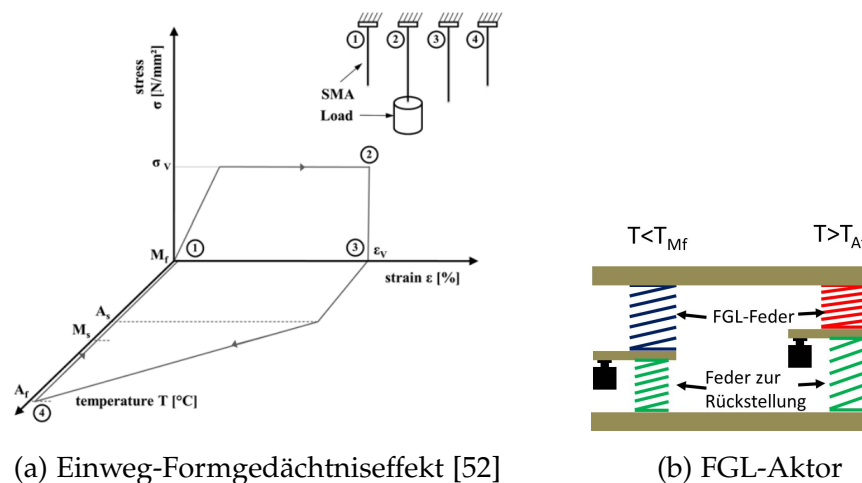


Abb. 3.4: Formgedächtniseffekt und FGL-Aktor. (a) Zusammenhang zwischen Temperatur, Dehnung und Gefüge einer FGL-Legierung beim Einweg-effekt [52]. (b) Ausführungsform eines FGL-Aktors.

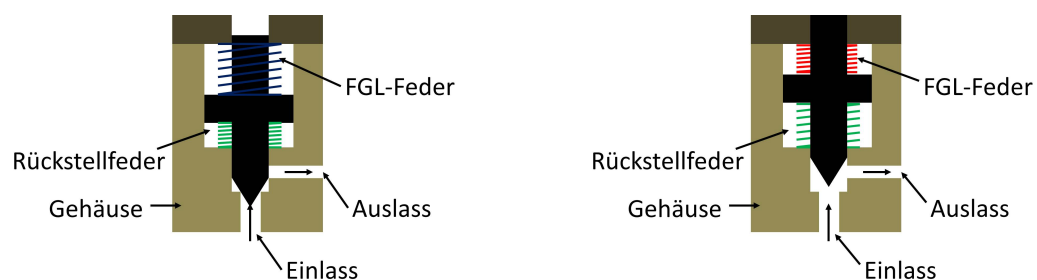


Abb. 3.5: Skizze eines Sitzventils mit FGL-Aktor. Links: Das Ventil ist durch die Rückstellfeder geschlossen. Rechts: Wird die FGL-Feder erwärmt, zieht sie sich in die zuvor eingepprägte Form zurück und öffnet das Ventil.

### 3.2.4 Elektrostatische Aktoren

Das Prinzip dieses Ventils beruht auf der Anziehung zweier Körper mit unterschiedlicher elektrostatischer Ladung. Eine Variante ist, dass man eine elektrisch leitende Folie zwischen zwei Elektroden bewegt. Zwischen Folie und Elektroden befindet sich dabei eine dünne Isolationsschicht. Wenn die Folie auf einem Potential von 0 V gehalten wird und von den Elektroden eine ebenfalls auf 0 V und die andere ein deutlich höheres Potential hat, bewegt sich die Folie zu der Elektrode mit dem höheren Potential. Durch das Wechseln der Spannung zwischen den Elektroden kann die Folie dann hin und her bewegt werden. Im linken Teil der Abbildung 3.6 ist dies veranschaulicht. Zwischen den beiden Platten strömt ein Gas in die Aktorkammer. In die obere und untere Platte ist jeweils eine Öffnung als Auslass für das Gas eingebracht. Durch Anlegen eines elektrischen Potentials an der unteren oder oberen Elektrode kann die Folie im Inneren bewegt werden. Diese verschließt im Anschluss entweder die obere oder untere Öffnung. Auf diese Weise wird das Gas gesteuert. Dieser Aktor kann im Aufbau sehr einfach gehalten werden. In Abbildung 3.7 ist ein 3/2-Wegeventil mit elektrostatischem Antrieb dargestellt. [54] Es gibt auch Aktoren die keine flexible Folie, sondern, wie in [55], ein starres Element besitzen, welches zwischen den Elektroden bewegt wird.

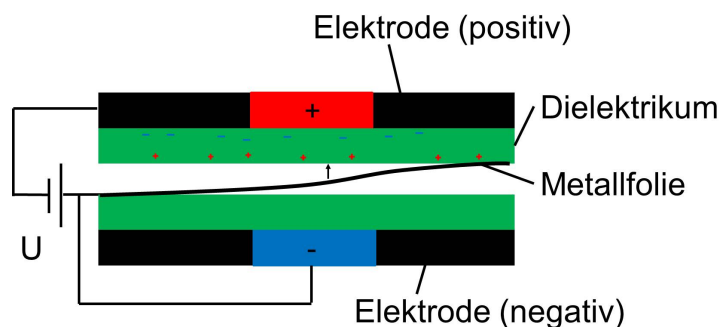


Abb. 3.6: Prinzip elektrostatischer Aktoren. Durch die angelegte Spannung an den Elektroden findet eine Polarisation des dazwischen befindlichen Dielektrikums statt. Damit ergibt sich eine Anziehungskraft zwischen der Metallfolie und dem Dielektrikum.

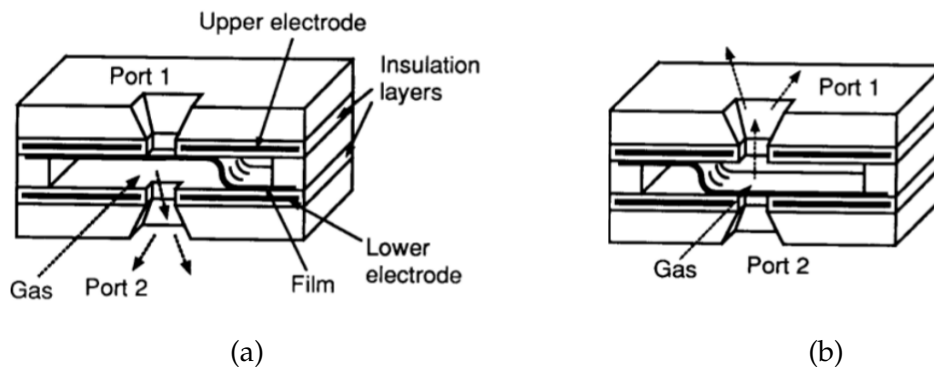


Abb. 3.7: Schematische Darstellung eines Ventils mit elektrostatischem Aktor. (a) Durch eine Spannung zwischen der oberen Elektrode und der Folie wird die obere Öffnung (Port 1) verschlossen. (b) Wird eine Spannung zwischen der unteren Elektrode und der Folie angelegt, verschließt diese die untere Öffnung (Port 2). [54]

### 3.2.5 Pneumatische Aktoren

Hier wird Druckluft, welche extern gesteuert wird, zum Schalten eines Ventils verwendet. Eine Ausführungsform ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Zwischen einem Schlauch zur Druckluftzuführung und dem eigentlich zu schaltenden Kanal befindet sich ein bewegliches Element, z. B. eine Membran. Wird das Ventil mit Druckluft beaufschlagt, dehnt sich die Membran und sperrt den Kanal, durch den das gesteuerte Medium fließt. Nach Wegnahme der Druckluft kehrt die Membran zurück und das Medium kann wieder weiterströmen. Der Öffnungsvorgang lässt sich durch das Anlegen eines Vakuums unterstützen. [56] Der Vorteil liegt darin, dass die Bereitstellung der zum Schalten benötigten Energie und die Steuerung extern geschehen, sodass das eigentliche Ventil einfach aufgebaut ist. Der große Nachteil hierbei ist, dass extern noch weitere Ventile benötigt werden, um die Druckluft für das eigentliche Ventil zu steuern. Zur Reduktion der externen Ventile wird von Thorsen et al. [57] eine Ventilmatrix nach dem Binärsystem beschrieben, bei dem die Anzahl der externen Ventile reduziert werden kann (s. Abb. 3.9). Dies ermöglicht es, mit  $n$  Ventilen in der Druckluftzufuhr  $2^{\frac{n}{2}}$  Kanäle zu schalten. Somit sind für 1024 Kanäle nur 20 Kontrollkanäle notwendig. Der Wirkungsgrad ist stark von der vorhandenen Druckluftversorgung abhängig. [3, 56–60]

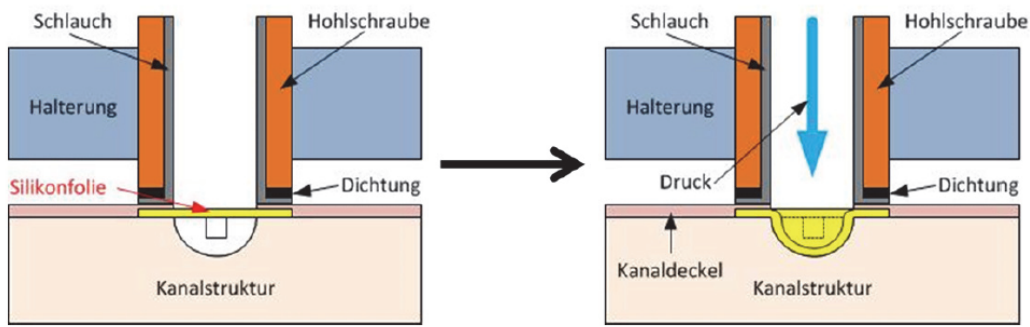


Abb. 3.8: Pneumatisch angetriebenes Ventil. Durch Druckluft wird die Silikonfolie nach unten gedrückt und verschließt den darunter liegenden Kanal. [60]

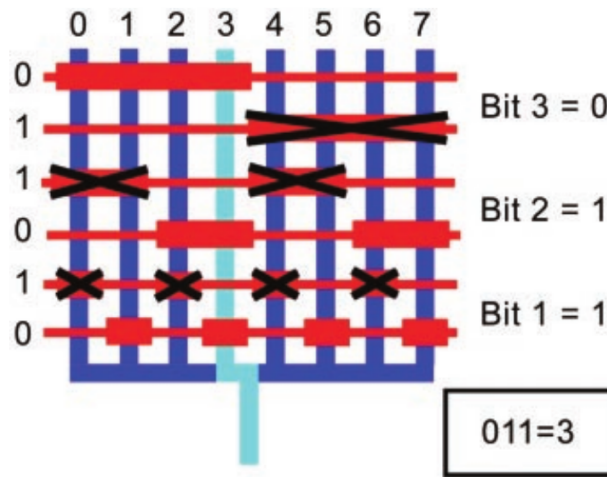


Abb. 3.9: Pneumatisch angetriebene Ventilmatrixschaltung nach Binärsystem. Acht Kanäle werden mit nur sechs Kontrollkanälen geschaltet. [57]

### 3.2.6 Aktoren auf Basis von Phasenübergängen

Bei diesen Ventilen wird der Phasenübergang von fest zu flüssig genutzt. Dies kann auf verschiedene Arten verwendet werden. Eine Variante ist das Aufschmelzen von Material. Durch Druck, z. B. Druckluft, kann es in eine Form gebracht werden, in der ein Fluidkanal verschlossen wird. Wird das Material soweit abgekühlt bis es erstarrt, bleibt der Kanal verschlossen [61] (s. Abb. 3.10(a)). Auf diese Weise lassen sich bistabile Ventile realisieren. Die andere Variante ist, ein Material zu verwenden, welches in der flüssigen Phase ein größeres spezifisches Volumen hat als in der festen. So dehnt sich das Material bei Erwärmung aus und kann einen Fluidkanal verschließen (s. Abb. 3.10(b)). Der große Nachteil bei diesem Aktortyp ist die langsame Reaktionszeit. [3, 62]

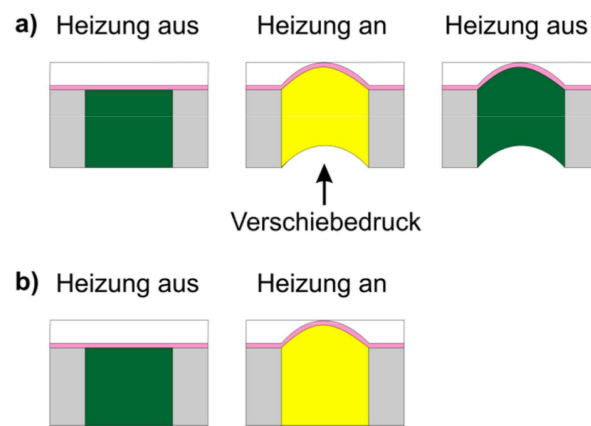


Abb. 3.10: Ventilaktoren auf Basis von Phasenübergängen. a) bistabiles Phasenübergangsventil pneumatisch verformt und b) monostabiles Phasenübergangsventil aktiviert durch Volumenänderung beim Phasenübergang zwischen fest und flüssig. [62]

### 3.2.7 Zusammenfassung

Die oben vorgestellten Aktoren unterscheiden sich stark in der Anzahl der benötigten Bauteile und der Komplexität des Gesamtaufbaus. Trotz der individuellen Vor- und Nachteile eines jeden Aktorprinzips hängen viele Eigenschaften, wie Kraft oder Hub, eines konkreten Aktors stark von der jeweiligen Umsetzung ab. Dies macht eine generelle vergleichende Bewertung schwierig. Ein Phasenübergangsventil besteht nur aus wenigen Komponenten. Somit eignet es sich gut, um einen kleinen Aktor aufzubauen. Allerdings sind dort die Schaltzeiten sehr groß. Die elektrostatischen Ventile können ebenfalls sehr klein aufgebaut werden und reagieren schnell. Die von ihnen ausgeübte Kraft ist dabei eher gering. Die weit verbreiteten Magnetventile können eine höhere Kraft bei ebenfalls geringen Reaktionszeiten von wenigen ms ausüben. Allerdings sind zu ihrem Aufbau viel mehr Bauteile notwendig. Diese werden dadurch deutlich aufwändiger und benötigen mehr Bauraum. Piezoelektrische Aktoren bringen von sich aus eine sehr schnelle Reaktionszeit und eine hohe Kraft mit sich. Ihr Nachteil des geringen Hubes lässt sich z. B. durch größere Piezoelemente oder mechanisch ausgleichen. Dies benötigt wiederum mehr Bauraum und erhöht die Komplexität.

Viel Potential für einen einfachen und kompakten Aufbau mehrerer Ventile bieten die oben beschriebenen pneumatischen Aktoren. Mit diesen lassen sich gute Leistungen hinsichtlich Schaltzeit, Kraft und Hub erreichen. Beim Bauraum muss beachtet werden, dass dort die Leistungserzeugung und die Steuerung vom eigentlichen Ventil getrennt sind. Wird nur das eigentliche Ventil betrachtet, so ist dieses sehr einfach aufgebaut und kann klein gehalten werden. Bezieht man die Leistungserzeugung und Steuerung mit ein, ist der Gesamtaufbau groß und aufwändig. Daher stellt sich die Frage: Wie kann bei einem fluidisch angesteuerten

Aktor eine einfache und kleine Steuerung in das Ventil integriert werden? Dazu wird für den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz eine ERF statt Luft als Medium verwendet. Bei dieser kann die Steuerung ebenfalls einfach und klein aufgebaut und in das Ventil integriert werden. Die Leistungserzeugung verbleibt als Einheit aus Pumpe und Druckregelung abseits der einzelnen Ventile bestehen. Um einen Überblick zu geben, wie eine Steuerungen der ERF aussehen kann, werden im nächsten Abschnitt verschiedene ER-Aktoren vorgestellt.

## 3.3 Elektrorheologische Aktoren

Bei elektrorheologischen Aktoren wird der elektrorheologische Effekt (s. Kapitel 2.1.2) zum Steuern der elektrorheologischen Flüssigkeit genutzt. So lassen sich in einem hydraulischen System Widerstände erzeugen. Dadurch kann an bestimmten Stellen der Druck erhöht bzw. gesenkt und der Fluidstrom gesteuert werden. Auf diese Weise lässt sich der ER-Effekt für die Steuerung für einen hydraulisch angesteuerten Aktor verwenden. [3,21]

In [63] wird eine Ventilanordnung aus vier ER-Ventilen beschrieben, um einen Kolben anzutreiben. Die einzelnen ER-Ventile bestehen aus einer runden Bohrung für die ERF mit einem Zylinder in der Mitte (s. Abb. 3.11 oben). Durch das Anlegen einer elektrischen Potentialdifferenz zwischen Zylinder und der äußeren Wand wird der Widerstand für die ERF erhöht. Die ERF wird an den beiden Enden des Zylinders vorbei in einen Tank gepumpt. Zwischen dem Zylinder und der Pumpe bzw. dem Tank ist jeweils ein ER-Ventil (s. Abb. 3.11 unten) installiert. So kann der Druck an den Ventilkolben durch die ER-Ventile eingestellt werden, wodurch sich der Kolben bewegt. Dabei wurden Elektroden mit einer Länge von 100 mm und 300 mm verwendet und Bewegungen mit einer Frequenz von 400 Hz realisiert. [63]



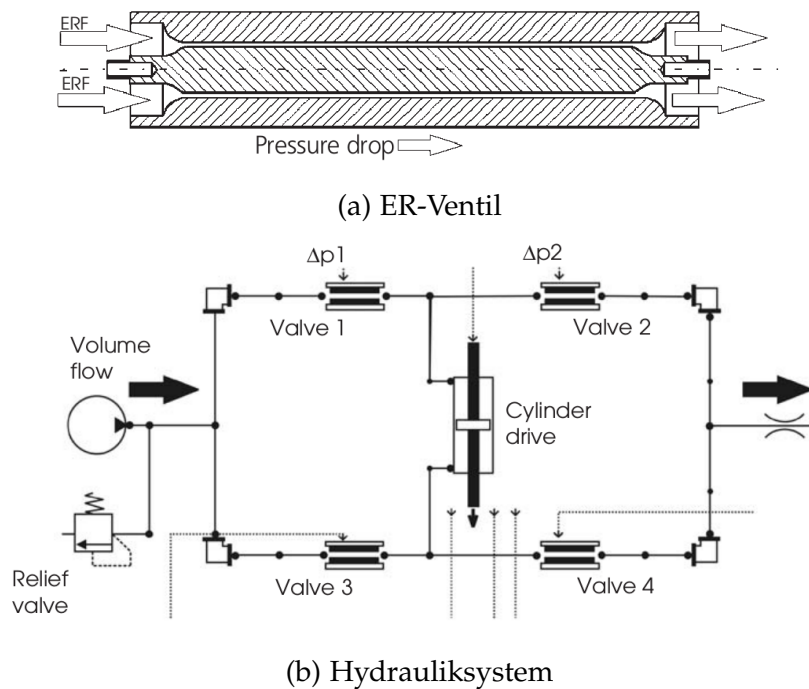


Abb. 3.11: Elektrorheologische Zylinderansteuerung. (a) ER-Ventil. Die ERF fließt durch den Spalt zwischen dem äußeren Zylinder und der Elektrode in der Mitte. Durch Anlegen einer Spannung dazwischen kann der Fluss der ERF reguliert werden. (b) Hydraulikschaltplan der Zylinderansteuerung. Mit einer Pumpe wird die ERF an dem Zylinder vorbei gepumpt. Durch die vier ER-Ventile kann dieser zu der einen oder anderen Zylinderseite gelenkt werden, wodurch sich dieser steuern lässt. [63]

In der Abbildung 3.12 sind zwei Ansätze für eine elektrorheologische Ansteuerung für ein Brailledisplay gezeigt. Dabei ist die Motivation einen ER-Aktor zu verwenden, dass man die einzelnen Aktoren klein halten und somit viele Pins pro Fläche ansteuern kann. Der Ansatz rechts wurde in [65] in einem Funktionsmuster mit sechs Pins umgesetzt. Um mit diesen eine Kraft von 0,15 N auszuüben, wurde ein Druck von 5,33 bar benötigt. Hierzu wurden Elektroden mit einer Länge von 15 mm verwendet. [64, 65]

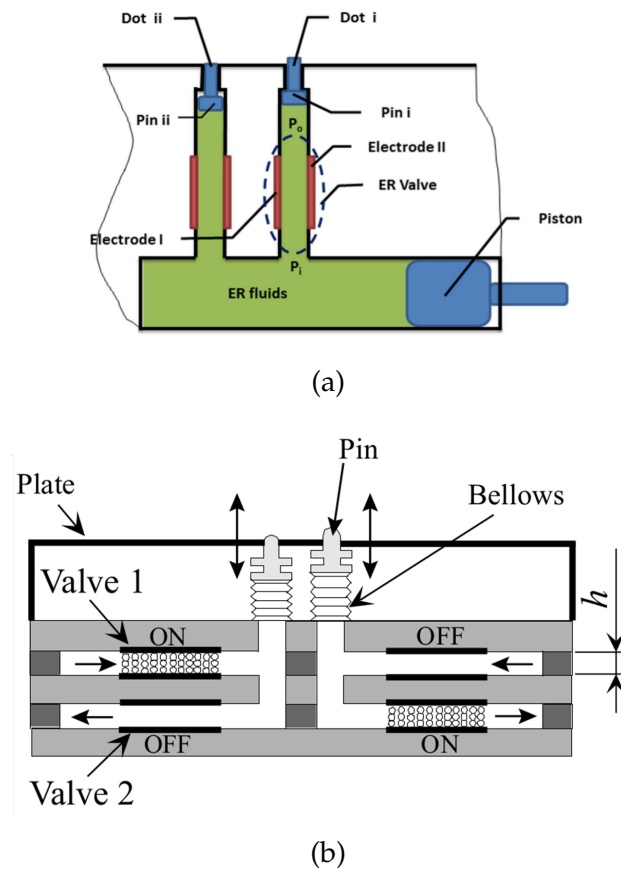


Abb. 3.12: Zwei Beispiele der Ansteuerungen eines Braille-Displays durch elektrorheologische Flüssigkeiten. (a) aus [64]; (b) aus [65]

Ein Mikroventil mit elektrorheologischer Ansteuerung ist in Abbildung 3.13 zu sehen. Bei diesem Ventil wird durch die ERF eine Membran ausgelenkt, welche einen Kanal verschließt. Dabei wurden sowohl die Kanalstrukturen als auch die Membran aus Polydimethylsiloxan (PDMS) gefertigt. Die Elektroden bestanden aus mit Ruß (25 %) angereichertem PDMS. Getestet wurde das Ventil mit Stickstoff bei einem Druck von 0,2 bar. Dazu wurde auf der ERF-Seite zum Schließen ein Druck von 0,41 bar und zum Öffnen ein Unterdruck von -0,41 bar eingestellt. [66]

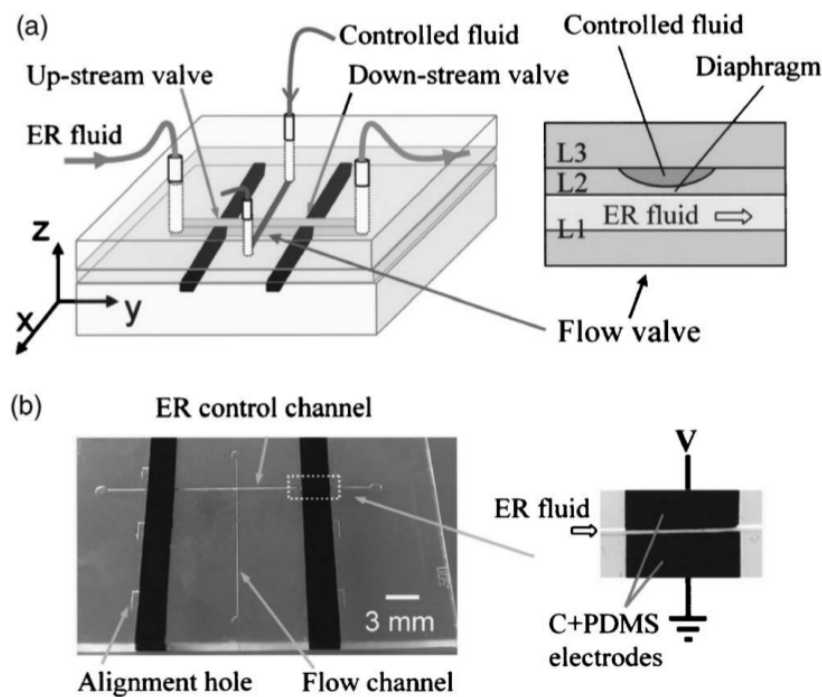


Abb. 3.13: Mikroventil mit elektrorheologischer Ansteuerung. (a) Schematische Darstellung des Ventils mit Kanal für das gesteuerte Fluid und ER-Kanal mit den integrierten Elektroden. (b) Aufnahme des ER-Kanals mit den Elektroden. [66]

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass es einige Ansätze gibt, wie man eine Antriebseinheit mit einer ERF aufbauen kann. In dem ersten Beispiel, dem Zylinderantrieb aus [63], wird die Leistungsfähigkeit eines ERF-Antriebs demonstriert. Durch die langen Elektroden von 100 mm bzw. 300 mm ist der Antrieb jedoch sehr groß. Ebenso ist der Aufbau komplex. Dadurch eignet sich das Konzept nicht für eine kompakte Ventilmatrix. Bei den Braille-Displays aus [64] und [65] wird ein ER-Antriebseinheit eingesetzt, um mehrere Aktoren in einer Ebene kompakt anzuordnen. Dazu wurden diese einfach gehalten. Das in [66] beschriebene Ventil ist ähnlich dem Ventilprinzip, welches dieser Arbeit zugrunde liegt. In beiden Fällen lenkt eine ERF eine Membran aus, die den Fluss des geschalteten Mediums blockiert. In [66] verschließt die Membran direkt den Kanal des geschalteten Mediums. Dies hat den Vorteil, dass kein Totvolumen vorhanden ist. Es wurden nur sehr kleine Drücke von 0,2 bar geschaltet und zum Öffnen wurde ein Unterdruck an der Membran erzeugt, was sehr aufwendig ist. In dieser Arbeit wird ein anderer Ansatz verfolgt, bei dem die Membran auf einen Ventilsitz drückt, wodurch sich eine definierte und schmale Dichtfläche ergibt. Dadurch kann eine bessere Dichtigkeit erreicht werden. Zudem soll die Ventilmatrix im Gegensatz zu dem Ventil aus PDMS und den dargestellten Braille-Displays einfacher in großen Stückzahlen gefertigt werden können.

Aus dem in [66] vorgestellten Ventil ergeben sich daher als nächste Schritte die schaltbaren Drücke zu erhöhen und das Schalten des Ventils zu verbessern. Besonders wichtig ist dabei eine selbständige Rückstellung der Membran zum Öffnen des Ventils. Zur Erhöhung der schaltbaren Drücke gilt es zunächst herauszufinden, welche Drücke in der ERF sich mit dem ER-Effekt in einem einfachen Aufbau steuern lassen. Der dazu entwickelte Testchip und die damit durchgeführten Versuche werden im nächsten Kapitel vorgestellt. Um ein verbessertes Schaltverhalten zu erhalten folgt im zweiten Schritt ein Ventilaufbau, in dem insbesondere der Bereich Membran und Ventilsitz optimiert wurde (Kapitel 5). Die im Anschluss aus diesen Erkenntnissen entwickelte Ventilmatrix wird in Kapitel 6 beschrieben.

# 4 Charakterisierung des ERF-Schaltverhaltens

Um einen Aktor, welcher mit einer ERF angetrieben wird, besser verstehen und somit auslegen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit Versuche zur Charakterisierung des Schaltverhaltens einer ERF durchgeführt. Im Fokus standen unterschiedliche Eigenschaften, welche für eine Antriebseinheit relevant sind. Die Kraft, die für einen ER-Aktors zur Verfügung steht, wird im Wesentlichen durch die Druckänderung in der ERF bestimmt, welche sich durch den ER-Effekt steuern lässt. Diese ist am größten, wenn ein Kanal durch den ER-Effekt gesperrt wird. Für die Reaktionszeit eines ER-Aktors ist hauptsächlich die Geschwindigkeit der Druckveränderung verantwortlich. In diese fließen neben der reinen Reaktionszeit der ERF noch weitere Faktoren ein. Auf elektrischer Seite ist dies die Zeit, die zum Aufbauen eines E-Feldes benötigt wird. Hier spielt die verwendete Elektronik und Steuerung eine Rolle. Das restliche fluidische System, wie Pumpe und Leitungen, bestimmt, wie schnell sich der Druck nach dem Reagieren der ERF verändert. Da ein Ventil nicht nur bei Raumtemperatur funktionieren soll, wurden auch Versuche bei Temperaturen von 5 °C bis 60 °C durchgeführt. Die in der Arbeit verwendete ERF ist das *RheOil 3.0*. Dieses besteht aus einem Silikonöl mit modifizierten Polyurethanpartikeln. Diese haben einen mittleren Durchmesser von 3  $\mu\text{m}$ . [70] Im Folgenden wird zuerst der verwendete Versuchsaufbau beschrieben, bevor im Anschluss auf die Messergebnisse eingegangen wird.

## 4.1 Versuchsaufbau

### 4.1.1 Testchip

Um das Sperren eines Kanals durch den ER-Effekt zu untersuchen, wurde ein Testchip entwickelt. In diesem befindet sich ein Kanal, durch welchen die ERF fließt. Dieser hat einen rechteckigen Querschnitt mit der Breite  $b$  und der Höhe  $d$  (= Elektrodenabstand). In der Mitte des Kanals befinden sich an zwei gegenüberliegenden Wänden Elektroden der Länge  $l$  (s. Abb. 4.1). Die Elektroden sind somit parallel angeordnet, wodurch ein nahezu homogenes E-Feld erzeugt wird. Andere Formen, wie z. B. ein runder Kanal, wären zwar strö-

nungstechnisch besser, allerdings lässt sich dort nur aufwendig, z. B. durch eine mittig platzierte Elektrode, ein homogenes E-Feld erzeugen. Die Druckdifferenzen, welche sich bei einem bestimmten E-Feld durch den ER-Effekt einstellen, liegen bei runder und rechteckiger Querschnittsform sehr nahe beieinander [68]. Damit die Partikel den Kanal nicht verstopfen, sollten die Abmessungen des Kanals (Höhe und Breite) deutlich größer sein, als der Partikeldurchmesser. Ein großer Querschnitt ist zudem wegen des geringeren hydraulischen Widerstandes von Vorteil. Dem entgegen steht, dass bei einer großen Kanalhöhe und dem sich daraus ergebenden großen Abstand der Elektroden höhere elektrische Spannungen notwendig sind. Daher haben die Kanäle eine geringe Höhe, um den Elektrodenabstand klein zu halten. Die Breite ist deutlich größer, damit der Strömungsquerschnitt groß und der hydraulische Widerstand gering ist. In den Versuchen wurde der Elektrodenabstand in einem Bereich von  $150\ \mu\text{m}$  bis  $550\ \mu\text{m}$  variiert. Auf eine Schutzschicht über den Elektroden wird verzichtet. Diese würde das elektrische Feld stark abfallen lassen, wodurch an den Elektroden eine wesentlich höhere Spannungen für das gleiche E-Feld im Kanal angelegt werden müsste (vgl. Kapitel 2.1.3). Der Testchip besteht größtenteils aus Polymeren (Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC)), um eine gute elektrische Isolation zu gewährleisten.

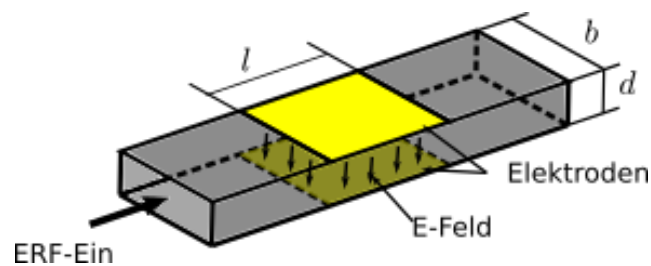
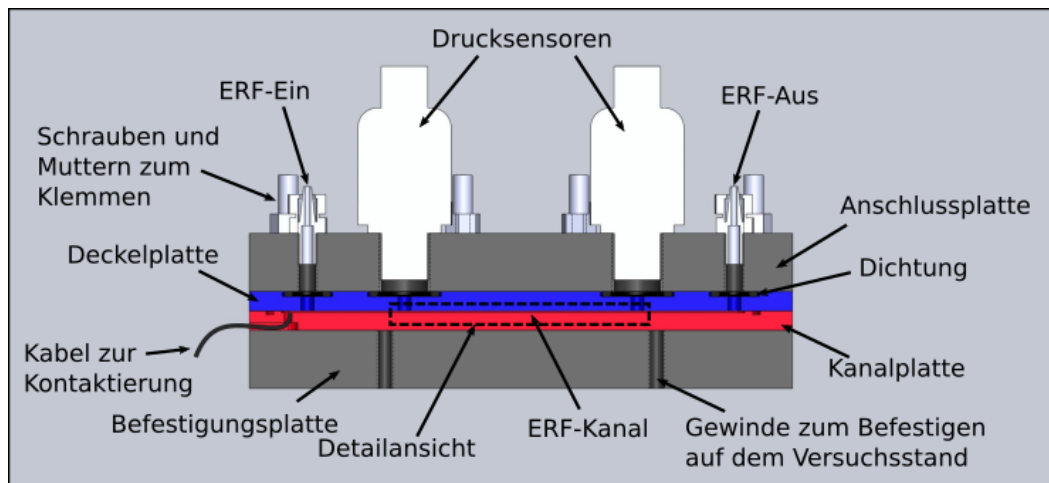


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Rechteckkanals mit Elektroden.

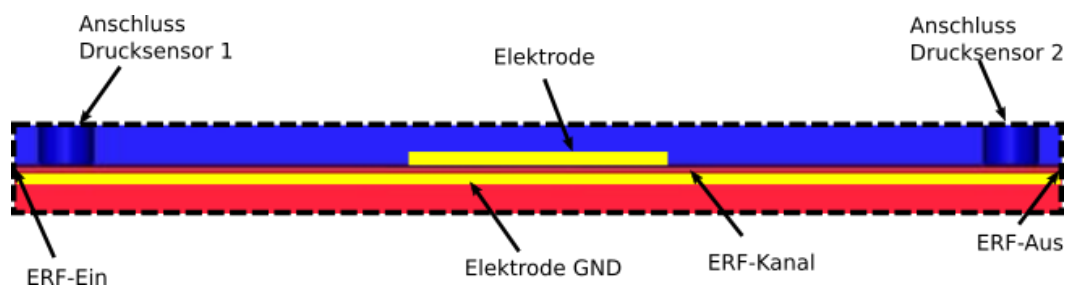
Die Fertigung des Testchips erfolgt in vier Schritten:

1. Herstellen der äußeren Kontur, des Kanals und der Bohrungen durch Fräsen
2. Aufbringen der Elektroden mit PVD-Verfahren
3. Kontaktieren der Elektroden mit leitfähigem Klebstoff
4. Verbinden der beiden Chiphälften mittels Kleben

In Abbildung 4.2a ist ein Schnitt durch den Testchip dargestellt. Der Kanal für die ERF ist in die Kanalplatte eingearbeitet und wird von der Deckelplatte verschlossen. Beide sind aus Polycarbonat (PC) durch Fräsen hergestellt. Dort befinden sich auch die Elektroden, die durch Aufdampfen einer Chrom-Gold-Schicht aufgebracht wurden (s. Detailansicht 4.2b). Auf diesen ist mit einem leitfähigen Klebstoff ein Kabel zur Kontaktierung angebracht. Die untere Elektrode (Elektrode GND) wurde während der Versuche konstant auf einem Potential von 0 V gehalten und nur das Potential der oberen Elektrode verändert. Die Kanal- und die Deckelplatte sind mit UV-aushärtendem Klebstoff verbunden. Dieser wurde mit einer Mischung aus Kapillar- und Kammerkleben zugeführt (s. Abb. 4.3). Der Klebstoff wurde durch Bohrungen in der Deckelplatte in einen Klebekanal gefüllt, welcher um den ERF-Kanal verläuft. Von dort aus fließt der Klebstoff bis zum Rand des ERF-Kanals. So ist der Kanal am Rand abgedichtet und die ERF kann nicht zwischen den Platten an den Elektroden vorbeifließen. In der Anschlussplatte werden Schraubverbindungen als fluidischer Anschluss und die Drucksensoren eingeschraubt. Diese sind über Bohrungen mit dem Kanal verbunden und über O-Ringe zwischen den Platten abgedichtet. Die Befestigungsplatte dient der Fixierung auf dem Versuchsstand. Mittels acht Schrauben werden die Platten zusammengehalten und die Kraft für die Dichtwirkung der O-Ringe aufgebracht. Durch den Aufbau können die Kanal- und Deckelplatte durch andere Platten mit unterschiedlichen Kanal- und/ oder Elektrodenabmessungen ausgetauscht werden, ohne die Drucksensoren und die fluidischen Anschlüsse entfernen zu müssen. Abbildung 4.4 zeigt ein Foto des eingebauten ERF-Testchips auf dem Versuchsstand.



(a) Gesamtansicht



(b) Detailansicht

Abb. 4.2: CAD-Modell des Testchips zur ERF-Charakterisierung. (a) Gesamtansicht mit Drucksensoren. (b) Detailansicht der Teststrecke mit den Elektroden (gelb markiert).

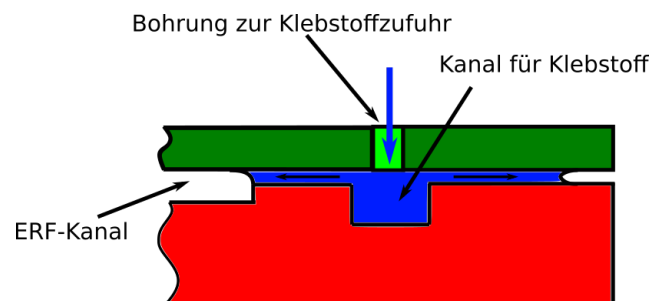


Abb. 4.3: Kombination von Kapillar- und Kammerkleben. Der Klebstoff wird durch Bohrungen in den Klebekanal gefüllt. Von dort aus fließt dieser durch Kapillarkräfte bis zum ERF-Kanal.



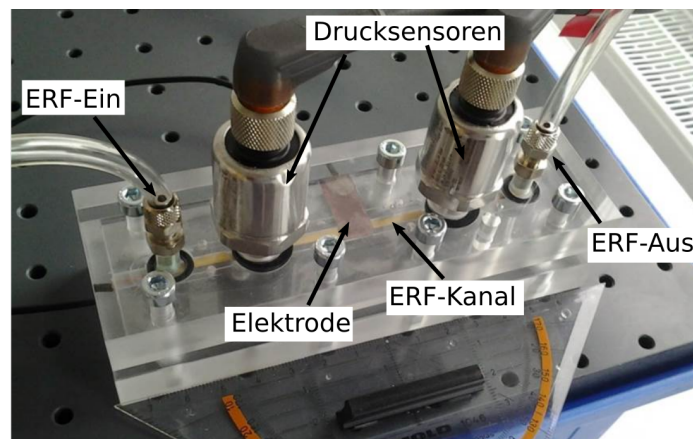


Abb. 4.4: Foto des Testchips in eingebautem Zustand mit fluidischen Anschlüssen und Drucksensoren.

Nach einigen Versuchen kam es zu einer teilweisen Ablösung der Elektroden (s. Abb. 4.5). Um dem entgegenzuwirken, wurden die Elektroden statt durch Aufdampfen mittels Sputtern einer Gold-Palladium-Schicht aufgetragen. In der Sputteranlage kann nur eine Fläche mit einem Durchmesser von 100 mm besputtert werden. Daher passte der erste Testchip mit einer Länge von 150 mm nicht hinein und musste umkonstruiert werden. Für einen kompakteren Aufbau erfolgt der Zulauf der ERF nicht mehr geradlinig auf die Teststrecke zu, sondern knickt vor bzw. hinter den Drucksensoren ab (s. Abb. 4.6). Der neue Testchip hat so eine maximale Breite von 90 mm. Die Maße der Teststrecke zwischen den Drucksensoren wurden nicht verändert, damit die Versuche beider Testchipvarianten miteinander verglichen werden können.



Abb. 4.5: Teilweise abgelöste Elektrode.

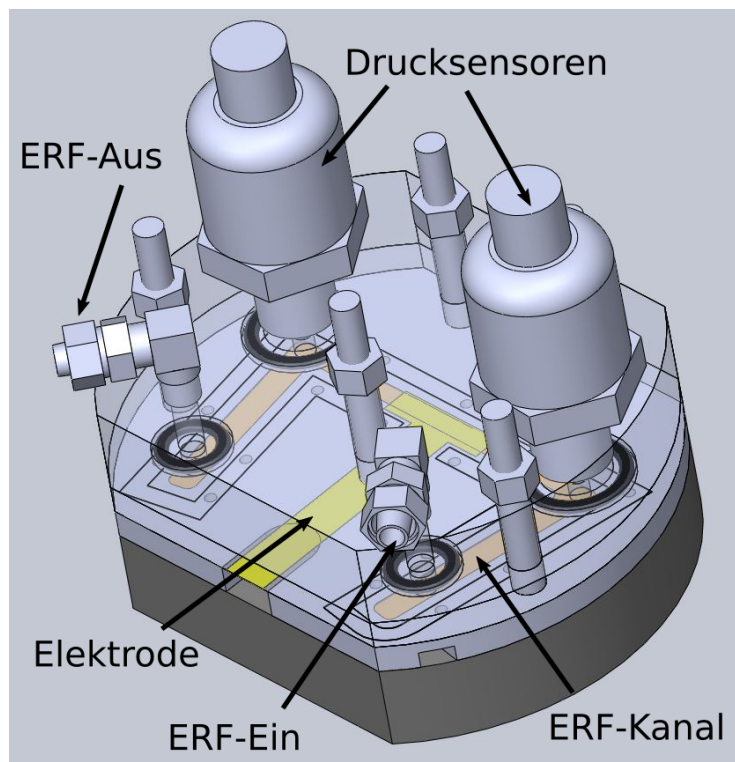


Abb. 4.6: CAD-Modell des geänderten Testchips zum Aufsputtern der Elektrode.

#### 4.1.2 Versuchsstand

Auf dem Versuchsstand sollen zuerst Versuche zur Charakterisierung des ERF-Schaltverhaltens und anschließend Ventiltests durchgeführt werden. Dazu muss mit dem Versuchsstand die ERF durch den Testchip bzw. das Ventil gepumpt und eine Hochspannung (HV = High Voltage) an die Elektroden angelegt werden. Die Einflüsse der beiden Parameter Druck in der ERF und Spannung an den Elektroden sollen während der Versuche untersucht werden. Daher ist die flexible Einstellung eines konstanten Drucks am Anfang des Versuchskreislaufs oder vor dem Testchip bzw. dem Ventil für die Versuche und das Betreiben der Ventile wichtig. Ebenso sollte die Spannung an den Elektroden eingestellt und während der Versuche variiert werden können. Zur Auswertung der Versuche zur Charakterisierung des ERF-Schaltverhaltens soll die Druckdifferenz über den Testkanal gemessen werden können. Bei den Ventiltests wird diese über das Ventil gemessen. Eine Aufzeichnung des Volumenstroms hilft dabei, ein vollständigeres Bild des fluidischen Verhaltens zu bekommen. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, hat auch die Temperatur einen Einfluss auf den ER-Effekt und wird daher ebenfalls aufgezeichnet. Zur Betrachtung der elektrischen Seite wird neben der Messung der eingestellten Spannung auch der elektrische Strom gemessen. So lassen sich Aussagen über die benötigte elektrische Leistung machen.

Zur Übersicht über den fluidischen Teil des Versuchsstand ist in Abbildung 4.7 der Hydraulikschaltplan des Versuchsstandes abgebildet. Zum Pumpen der ERF wurden zwei verschiedene Varianten benutzt. Damit das Pumpen der ERF pulsationsfrei geschieht und der Druck am Anfang des ERF-Systems gut geregelt werden kann, wurde eine „Druckbehälterpumpe“ verwendet. Diese besteht aus zwei Druckbehältern (DB1 und DB2), von denen einer mit dem Anfang und einer mit dem Ende des Hydrauliksystems verbunden ist. Die ERF wird in den ersten Behälter (DB1) gefüllt und mit Druckluft beaufschlagt. So wird die ERF aus dem Behälter durch den Versuchsaufbau in den anderen Behälter gepumpt. Bevor der erste Druckbehälter leer ist, werden die Druckbehälter durch das Schalten der Ventile V2 bis V5 andersherum angeschlossen und die ERF kann von DB2 durch den Versuchsaufbau in DB1 gepumpt werden. Der Druck wird über einen Druckregler an der Druckluft eingestellt. Ein wesentlicher Nachteil dieser Variante ist, dass der Versuch nach einer bestimmten Durchflussmenge angehalten und zwischen den beiden Druckbehältern umgeschaltet werden muss. Auch wird durch den Kontakt der ERF mit der Luft diese in die ERF eingetragen. Um über einen längeren Zeitraum einen kontinuierlichen Fluss der ERF zu gewährleisten, wurde eine Zahnradpumpe (ZP) und ein Druckregelventil (PR) parallel zu der „Druckbehälterpumpe“ eingebaut. Mit den Ventilen V6 und V7 kann zwischen den beiden Pumpenvarianten umgeschaltet werden. Durch ein Magnetventil (V1) kann der Fluss der ERF gestoppt werden. Bevor die ERF zu den Sensoren kommt, muss sie noch durch den Filter (F) mit einer Maschenweite von  $100\ \mu\text{m}$  fließen. Die Partikel der ERF können den Filter passieren, während grobe Verschmutzungen, welche z. B. den Testkanal verstopfen könnten, herausgefiltert werden. Die Temperatur der ERF wurde vor (T1) und hinter (T2) dem Testchip gemessen. Dazu kamen PT 100-Temperatursensoren zum Einsatz. Damit die Temperatur möglichst genau gemessen werden kann, sind die Sensoren direkt in einem von der ERF durchströmten Kanal montiert. Zur Messung des Drucks wurden zwei Drucksensoren (P1 und P2) verwendet. Wie oben beschrieben, ist ein Drucksensor vor (P1) und einer nach (P2) dem Testkanal direkt im Testchip montiert. Für die Ventiltests wurden diese vor bzw. hinter dem Ventil montiert. Zur Überwachung des Volumenstroms sind zwei Sensoren (Q1 und Q2) eingebaut. Q1 ist ein Ovalradsensor für große Volumenströme. Kleine Volumenströme ( $< 8\ \text{ml}/\text{min}$ ) liegen außerhalb des Messbereichs, weswegen der Sensor Q2 mit einem thermischen Messprinzip hinzugefügt wurde. Dieser hat einen Messbereich von  $\pm 120\ \text{ml}/\text{min}$ . Ein Überblick über die wichtigsten verwendeten Sensoren und Geräte ist im Anhang zu finden.

Die Steuerung und die Datenaufzeichnung für den Versuchsstand erfolgt über das Programm *LabVIEW*. Die Messsignale der Druck-, Volumenstrom- und Temperatursensoren werden über einen A/D-Wandler eingelesen und die Steuerungssignale für die Druckregler, die Pumpe und das Magnetventil über einen D/A-Wandler ausgegeben (s. Abb. 4.8). Die Kommunikation mit der HV-Quelle findet über einen zweiten D/A- bzw. A/D-Wandler statt.

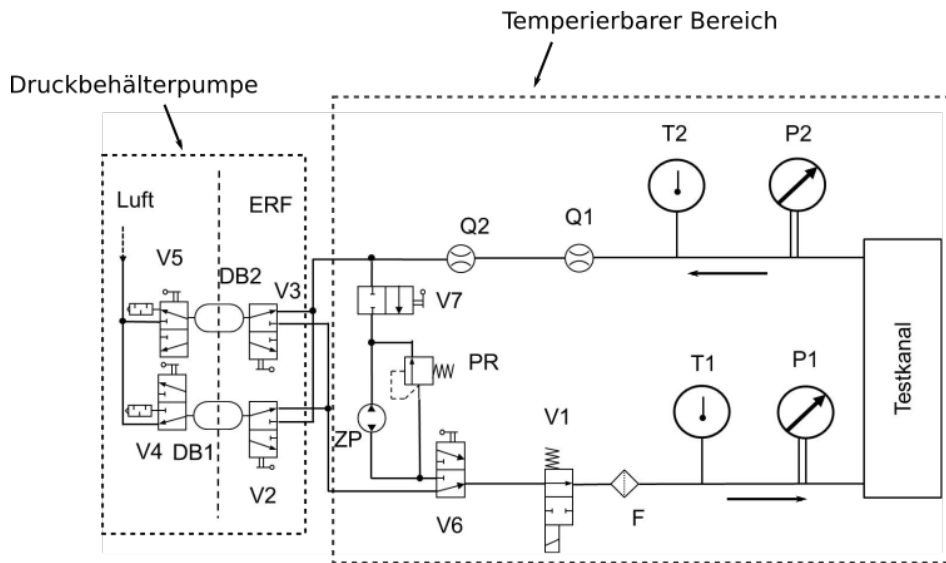


Abb. 4.7: Hydraulischplan des Versuchsstands.

Darüber wird die Ausgangsspannung gesteuert und die Messungen von Strom und Spannung am Ausgang der HV-Quelle eingelesen. Über die Bedieneroberfläche des Steuerungsprogramms kann der Versuchsstand sowohl manuell gesteuert als auch verschiedene Versuchsabläufe, wie eine Spannungsrampe, ausgewählt werden, die dann automatisch durchlaufen wird. So ist gewährleistet, dass die Versuche immer gleich ablaufen. Die Parameter, wie Dauer, Minimal- und Maximalwerte oder Anzahl der Wiederholungen, sind individuell einstellbar.

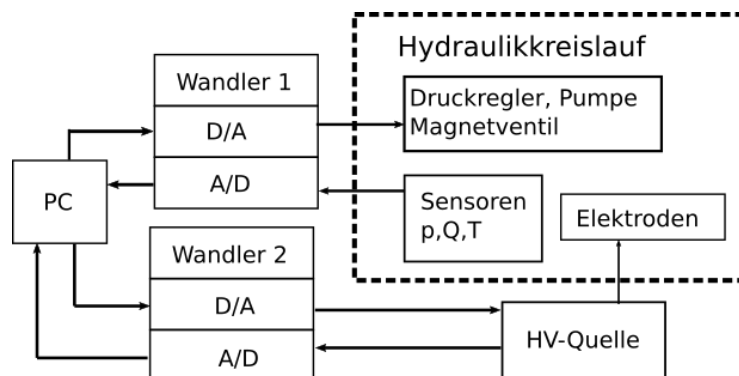


Abb. 4.8: Darstellung der Kommunikation zwischen PC und den Komponenten des Versuchsstands. Über den ersten Wandler wurden die Steuersignale zum Druckregler, der Pumpe und dem Magnetventil gesendet und die Messsignale der Druck-, Volumenstrom- und Temperatursensoren eingelesen. Der zweite Wandler diente der Kommunikation mit der HV-Quelle.

Um Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen, wurde ein Teil des Versuchsaufbaus mit einer Abdeckung aus Styropor isoliert. Die Temperatur im Inneren kann über einen Öl-/ Luft-Wärmeübertrager, welcher durch einen Ventilator zwangsumströmt wird, eingestellt werden. Das Öl wird außerhalb temperiert und durch den Wärmeübertrager gepumpt. Somit kann bei Benutzung der Zahnradpumpe der Fluidkreislauf der ERF innerhalb der temperierten Box stattfinden (vgl. Abb. 4.7).

Wegen der Hochspannung wurde der Versuchsaufbau zur Sicherheit in einem Gehäuse untergebracht. Beim Öffnen wird die Verbindung zur Hochspannungsquelle unterbrochen und die angeschlossenen Bauteile werden geerdet. In Abbildung 4.9 ist ein Foto des Versuchsaufbaus zu sehen.

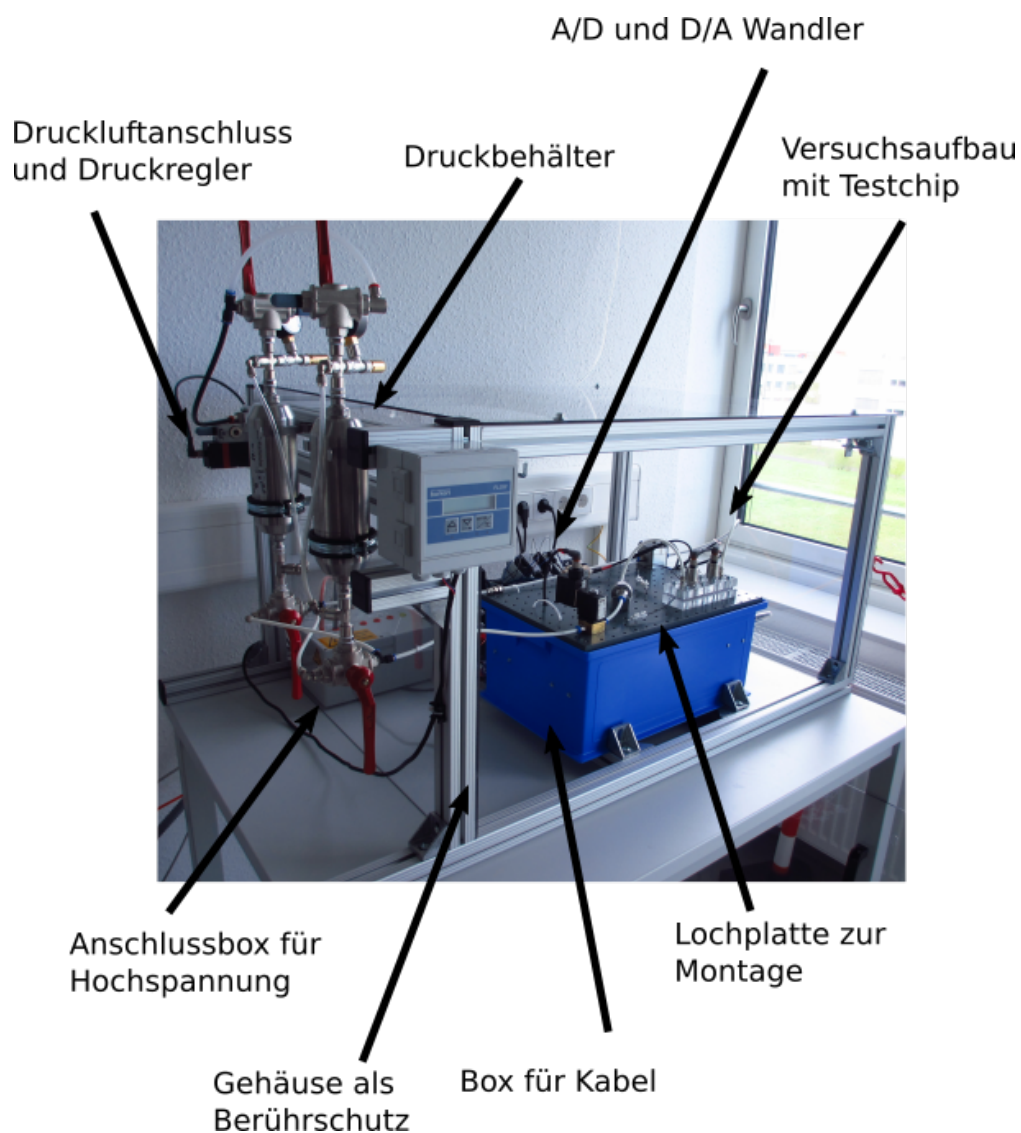


Abb. 4.9: Foto des Versuchsaufbaus.

## 4.2 Versuche

### 4.2.1 Versuchsablauf

Im Folgenden wird der Ablauf eines Versuchs dargestellt, wie er zur Ermittlung der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Ergebnisse durchgeführt wurde. Am Anfang des Hydraulikkreislaufes ist ein konstanter Druck eingestellt, mit dem die ERF durch den Testchip gepumpt wird. In Abbildung 4.10 ist der Testkanal schematisch dargestellt. Der Druck wird am Anfang ( $p_1$ ) und am Ende ( $p_2$ ) der Teststrecke gemessen. Fließt die ERF durch den Testkanal, stellt sich aufgrund des Fließwiderstandes im Kanal eine Druckdifferenz zwischen den beiden Messpunkten ein ( $p_1 > p_2$ ). Nach einer kurzen Einlaufzeit wird eine Spannung an den Elektroden angelegt. Dies löst den ER-Effekt aus und der Fließwiderstand im elektrischen Feld zwischen den Elektroden steigt an. Somit steigt auch die Druckdifferenz zwischen Kanalansatz und Kanallende ( $p_1 \gg p_2$ ). Die elektrische Spannung wird weiter erhöht, bis der ER-Effekt so groß ist, dass der Kanal gesperrt ist. Bei einem ersten kontinuierlichen Ansteigen der Spannung kann ein Bereich festgelegt werden, in dem der Kanal gesperrt wird. Anschließend lässt sich in einem zweiten Durchlauf durch eine langsamere, schrittweise Erhöhung der Spannung in dem Bereich der Wert genauer bestimmen. Die Spannung, bei der der Kanal durch den ER-Effekt sperrt, wird im Folgenden als Sperrspannung ( $U_{Sperr}$ ) bezeichnet.

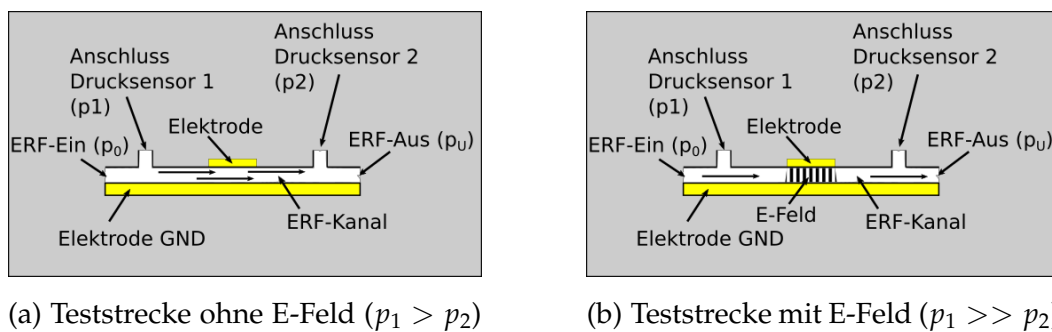


Abb. 4.10: Schematische Darstellung der Messstrecke im Testchip. In der Mitte des Kanals befinden sich die Elektroden. Am Anfang ( $p_1$ ) und am Ende ( $p_2$ ) des Testkanals wird der Druck gemessen. Vor dem Testchip wird ein konstanter Druck ( $p_0$ ) eingestellt und hinter dem Testchip herrscht Umgebungsdruck ( $p_u$ ).

In Abbildung 4.11 sind die während eines Versuchs aufgezeichneten Messwerte von Spannung ( $U$ ), Volumenstrom ( $Q$ ) und den Drücken ( $p$ ) vor und hinter dem Testkanal zu sehen. Dieses exemplarische Beispiel wurde an einem Testchip mit einer Kanalhöhe von  $160 \mu\text{m}$  und  $10 \text{ mm}$  langen Elektroden durchgeführt. Der Druck vor dem Testkanal ist auf  $4 \text{ bar}$  eingestellt



und die Spannung wird während des Versuchs langsam kontinuierlich erhöht. In dem Diagramm ist der Verlauf des Volumenstroms über die an den Elektroden angelegte Spannung dargestellt. Der Volumenstrom verringert sich mit steigender Spannung, bis er zum Stillstand kommt. Zusätzlich ist der Druck vor und hinter den Elektroden zu sehen. Der Druck vor dem Testkanal bleibt bei etwa 4 bar und der Druck hinter dem Testkanal fällt langsam auf null ab. Durch den Anstieg der Spannung an den Elektroden steigt der Fließwiderstand im Kanal durch den ER-Effekt an, bis dieser so hoch ist, dass keine ERF mehr fließt, wie an dem Verlauf des Volumenstroms zu erkennen ist. Das Schließen des Kanals ist ebenfalls an dem Druck hinter den Elektroden zu erkennen. Durch den erhöhten Fließwiderstand sinkt dieser, bis er Umgebungsdruck erreicht hat. An dieser Stelle ist der Kanal gesperrt.

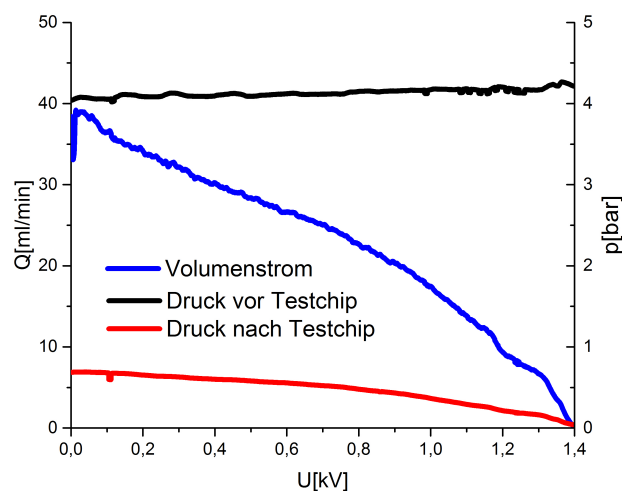


Abb. 4.11: Versuchsablauf zur Ermittlung der Sperrspannung ( $U_{Sperr}$ ). Dargestellt ist der Verlauf des Volumenstroms und des Drucks über der Spannung.

#### 4.2.2 Einfluss von Elektrodenabstand und Elektrodenlänge

Die Größe und der Abstand der Elektroden hat einen Einfluss auf das Sperren des Kanals durch den ER-Effekt und die dazu benötigte Spannung. Um dies zu untersuchen, wurden Versuche mit verschiedenen Testchips durchgeführt. Die Kanalhöhe variierte dabei zwischen  $150\ \mu\text{m}$  und  $550\ \mu\text{m}$  und die Elektrodenlänge betrug 10 mm und 20 mm. Jeder Testchip durchlief den oben beschriebenen Versuchsablauf bei unterschiedlichen Drücken. Eine obere Grenze für den Druck stellte die verfügbare Druckluftversorgung dar und die Durchschlagsfestigkeit ( $E_{DS}$ ) der ERF ( $\geq 10\ \text{kV/mm}$ ) bestimmte die obere Grenze für die angelegte Spannung.

Anhand von Testchips mit einem Elektrodenabstand von  $150\ \mu\text{m}$ ,  $200\ \mu\text{m}$  und  $350\ \mu\text{m}$  bei einer Elektrodenlänge von  $20\ \text{mm}$ , soll der Einfluss des Elektrodenabstandes in Abb. 4.12 veranschaulicht werden. Dort ist die benötigte Sperrspannung über den eingestellten Druck in der ERF aufgetragen. Die dargestellten Messpunkte der verschiedenen Testchips zeigen, dass mit kleinerem Elektrodenabstand weniger Spannung nötig ist, um den Kanal bei gleichem Druck zu sperren. Dabei ist der wichtigste Einfluss, dass das E-Feld bei gleicher Spannung mit kleinerem Elektrodenabstand größer ist. Dies führt allerdings dazu, dass die Durchschlagsfestigkeit früher erreicht wird und die Spannung, die maximal an die Elektroden angelegt werden kann, geringer ist.

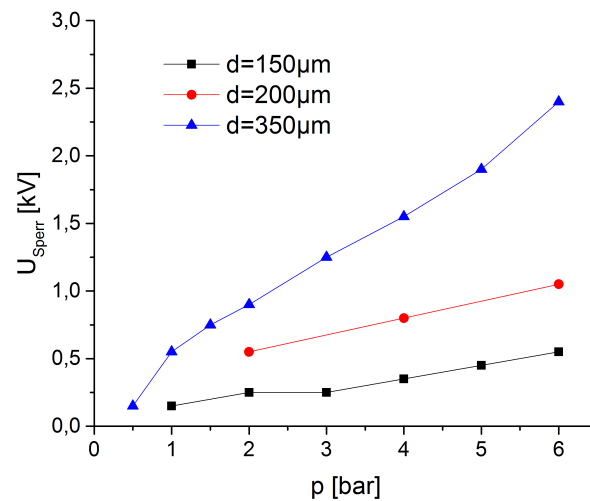


Abb. 4.12: Sperrspannung ( $U_{\text{Sperr}}$ ) bei unterschiedlichen Elektrodenabständen ( $d$ ) und gleicher Elektrodenlänge von  $20\ \text{mm}$ .

Ist die Elektrode länger, wirkt der ER-Effekt auf einer längeren Strecke. Abbildung 4.13 veranschaulicht diesen Einfluss. Die beiden dargestellten Messreihen sind mit Testchips mit gleichem Elektrodenabstand ( $150\ \mu\text{m}$ ) und unterschiedlichen Elektrodenlängen ( $10\ \text{mm}$  und  $20\ \text{mm}$ ) aufgezeichnet worden. Die Aufzeichnungen zeigen, dass bei einer kleineren Elektrodenlänge eine höhere Spannung zwischen den Elektroden nötig ist, um einen Kanal bei gleichem Druck zu sperren. Gleichzeitig ist bei einer längeren Elektrode auch der maximale Druck, bei dem der Kanal noch gesperrt werden kann, größer. Der maximale Druck wird durch die Durchschlagsfestigkeit der ERF begrenzt. Daher enden im Diagramm die Messwerte für die Elektrodenlänge  $l=10\ \text{mm}$  bei  $4\ \text{bar}$ .



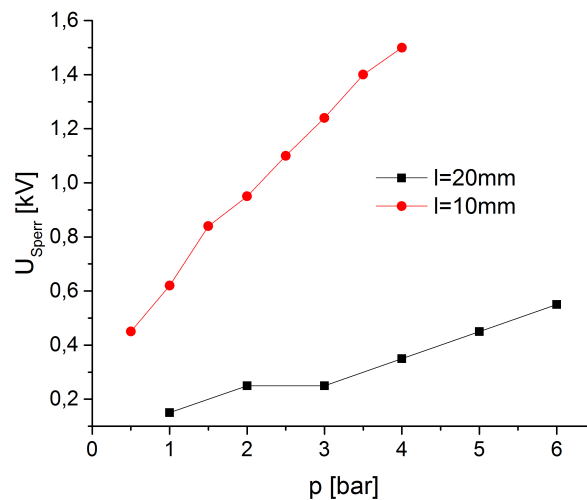


Abb. 4.13: Sperrspannung ( $U_{Sperr}$ ) bei gleichem Elektrodenabstand von  $150\ \mu\text{m}$  und unterschiedlichen Elektrodenlängen ( $l$ ).

Um die Auslegung eines Aktors zu unterstützen, sollte die benötigte Sperrspannung auch für nicht getestete Elektrodenabmessungen berechnet werden können. Dazu kann aus den Messwerten eine empirische Formel zur Berechnung der Sperrspannung aufgestellt werden. Mit ansteigendem Druck  $p$  und größerem Elektrodenabstand  $d$  wird die benötigte Spannung  $U$  größer, bei längerer Elektrode  $l$  jedoch geringer. Um dieses auszudrücken, wurde die Gleichung 4.1 aufgestellt. Zur Bestimmung der unbekannt Parameter  $a_1$  bis  $a_4$  wurde ein Least-Square-Fit (s. Kapitel 2.1.4) verwendet und auf die durchgeführten Messungen, wie sie zum Teil in den Abbildungen 4.12 und 4.13 dargestellt sind, angewendet.

$$U_{Sperr} = a_1 \Delta p^{a_2} \frac{d^{a_3}}{l^{a_4}} \quad (4.1)$$

Mit der Formel zur Berechnung der Sperrspannung lässt sich auch der Einfluss von Elektrodenabstand und Elektrodenlänge veranschaulichen. In Abbildung 4.14 sind die so berechneten Sperrspannungen für einen konstanten Druck dargestellt. Im linken Diagramm ist die Sperrspannung für eine konstante Elektrodenlänge über den Elektrodenabstand aufgetragen. Im rechten Diagramm wurde der Elektrodenabstand konstant angenommen und die Sperrspannung über die Elektrodenlänge aufgetragen.

Wird für die Sperrspannung die Durchschlagfestigkeit ( $E_{DS}$ ) als Grenze genommen (4.2), lässt sich auch der maximale Druck abschätzen, bei dem der Kanal gesperrt wird. Setzt man die aus der Durchschlagfestigkeit berechnete maximale Spannung (4.2) in die Formel zur

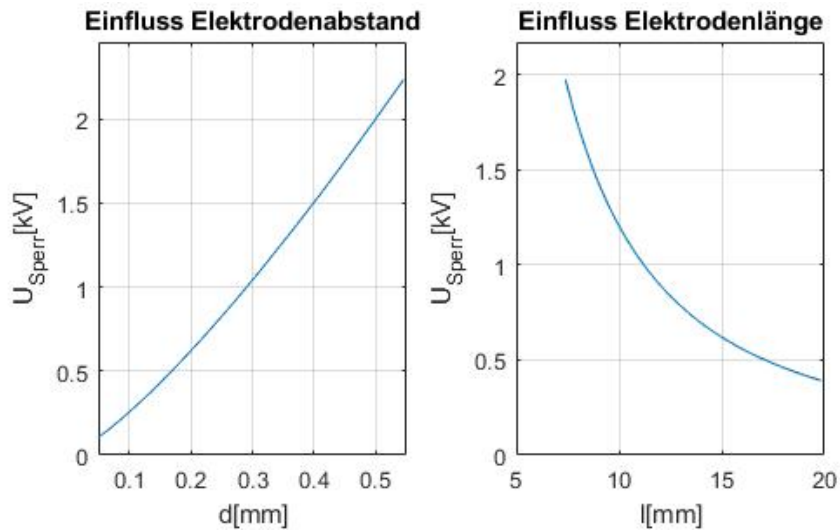


Abb. 4.14: Einfluss des Elektrodenabstands und der Elektrodenlänge auf die Sperrspannung. Im linken Diagramm ist die Sperrspannung für einen konstanten Druck und konstanter Elektrodenlänge über den Elektrodenabstand aufgetragen. Im rechten Diagramm wurde der Elektrodenabstand konstant angenommen und die Sperrspannung über die Elektrodenlänge aufgetragen.

Berechnung der Sperrspannung (4.1) ein und stellt diese nach der Druckdifferenz um, ergibt sich Formel 4.3. Bei einem geringeren Elektrodenabstand wird die Durchschlagsspannung früher erreicht. Dadurch verringert sich der Exponent des Elektrodenabstandes ( $d$ ) von  $a_3$  auf  $a_3 - 1$ . Dadurch hat der Elektrodenabstand einen geringeren Einfluss auf den maximal sperrbaren Druck.

$$U_{\max} = E_{DS} d \quad (4.2)$$

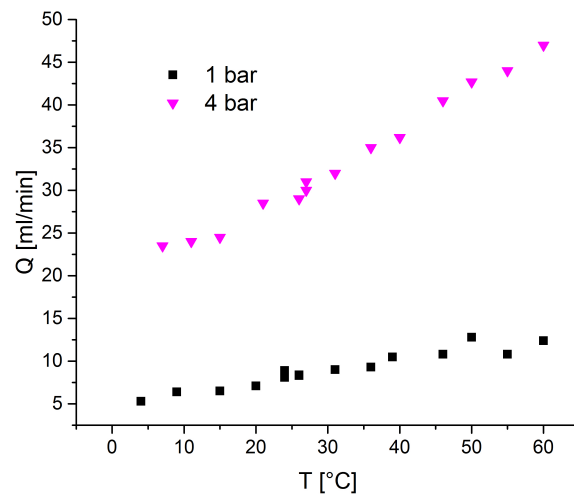
$$\Delta p_{\max} = \left( E_{DS} \frac{l^{a_4}}{a_1 d^{a_3-1}} \right)^{\frac{1}{a_2}} \quad (4.3)$$

### 4.2.3 Temperatureinfluss

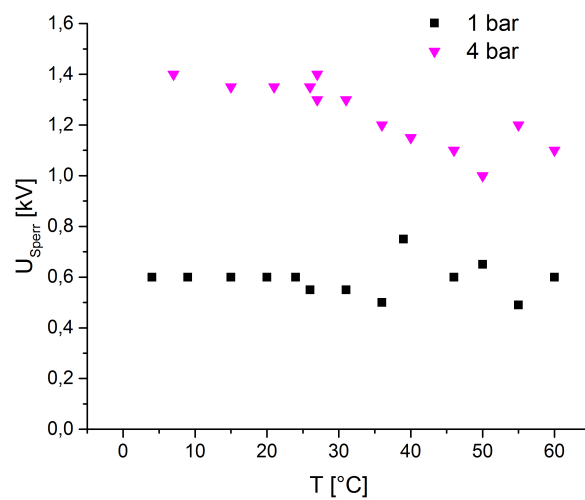
Die bisher beschriebenen Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Weitere Versuche sollten zeigen, ob das Schalten der ERF und somit ein Ventil mit einer ER-Antriebs-einheit auch in einem größeren Temperaturbereich funktioniert. Wie oben in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, kann die Temperatur des Versuchsaufbaus über einen Wärmeübertrager gesteuert und in der ERF jeweils beim Einströmen und Verlassen des Testchips gemessen werden. Die Versuche fanden in einem Bereich von 5 °C bis 60 °C statt, wobei die Schrittweite 5 °C betrug. Bei Drücken von 1 bar, 2 bar, 3 bar und 4 bar wurde bei jedem Temperaturschritt zunächst der Volumenstrom ohne elektrische Spannung an den Elektroden gemessen und anschließend die Sperrspannung ermittelt. In Abbildung 4.15a ist der Volumenstrom ohne elektrische Spannung an den Elektroden über der Temperatur aufgetragen. Dieser erhöht sich mit steigender Temperatur. So macht sich eine durch die erhöhte Temperatur bedingte Abnahme der Viskosität des Öls bemerkbar. Der Einfluss der Temperatur auf die Sperrspannung (s. Kapitel 4.2.1) ist in der Abbildung 4.15b dargestellt. Dort ist die Sperrspannung über der Temperatur, bei der diese ermittelt wurde, für verschiedene Drücke aufgetragen. Bei den Messpunkten, die bei 4 bar aufgenommen wurden, wird die Sperrspannung mit steigender Temperatur tendenziell etwas geringer. Die Sperrspannung bei 1 bar liegt in dem gemessenen Temperaturbereich bei etwa 0,6 kV. Dort ist auch gut zu erkennen, dass die Messwerte bei höheren Temperaturen stärker streuen. Während den Versuchen konnte die Temperatur nicht im gesamten Testaufbau konstant gehalten werden. Dies lag zum einen an der fehlenden Regelung innerhalb der isolierten Box. Zum anderen erfolgte in der Pumpe eine Wärmeübertragung auf die ERF. Somit lag die ERF-Temperatur vor dem Testchip etwas höher als dahinter. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das Sperren des Kanals auch in einem Temperaturbereich von 5 °C bis 60 °C funktioniert und ein so angetriebenes Ventil auch außerhalb von Laborbedingungen funktionieren kann. Die exakte Auswirkung der Temperatur auf das Sperren eines Kanals sollte in weiteren Versuchen untersucht werden.

### 4.2.4 Reaktionszeit

Für die Reaktionszeit eines Ventils ist es entscheidend, wie schnell der Druck vor den Elektroden ansteigt. Um dies zu betrachten, wurde ein konstanter Druck am Anfang des Versuchsaufbaus eingestellt und anschließend eine vorher eingestellte Spannung auf die Elektroden geschaltet (s. Abb. 4.16). Anhand des Druckverlaufs konnte dann die Reaktion der ERF beobachtet werden. Nachdem die Spannung auf die Elektroden geschaltet wurde, ist der Kanal blockiert. Der Druck vor dem Testkanal steigt und sinkt dahinter auf Umgebungsdruck. In dem gezeigten Versuch vergehen 8 ms bis der Druck vor den Elektroden ansteigt.



(a) Volumenstrom



(b) Sperrspannung

Abb. 4.15: Einfluss der Temperatur auf das Verhalten der ERF. (a) Einfluss der Temperatur auf den Volumenstrom, wenn keine Spannung an den Elektroden angelegt ist. (b) Einfluss der Temperatur auf die Sperrspannung.

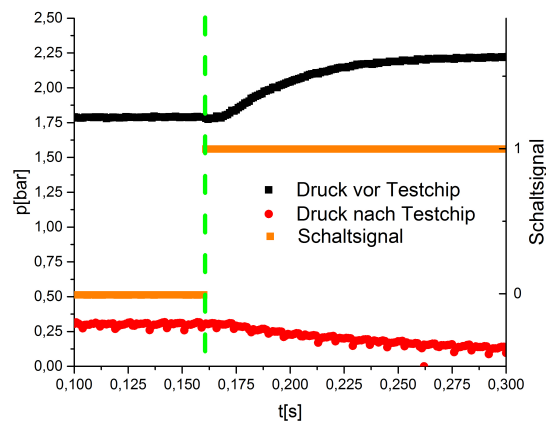
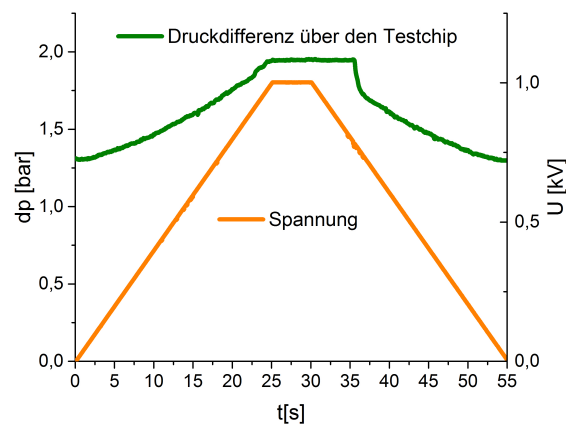


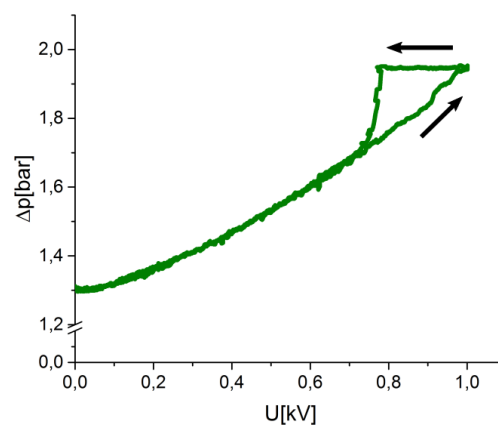
Abb. 4.16: Druckverlauf vor und hinter dem Testkanal beim Zuschalten einer Spannung an den Elektroden.

#### 4.2.5 Hysterese

Um zu untersuchen, ob ein Hystereseverhalten auftritt, wurden Versuche durchgeführt. Ein Versuch ist in Abbildung 4.17 dargestellt. In diesem wurde der oben beschriebene Versuchsaufbau mit einem Testchip mit einer Kanalhöhe von  $160 \mu\text{m}$  und 10 mm langen Elektroden verwendet. Während des Versuchs herrschte am Anfang des Versuchsaufbaus ein konstanter Druck. Abbildung 4.17a zeigt den Versuchsablauf. Nach einer Verweilzeit von 5 s wurde die Spannung zwischen den Elektroden kontinuierlich bis zur Sperrung des Kanals erhöht und nach weiteren 5 s Verweilzeit wieder auf Null abgesenkt. Das Durchlaufen der Spannungsrampe erfolgte zweimal hintereinander. In Abbildung 4.17b ist die dabei aufgezeichnete Druckdifferenz über den Testkanal über der an den Elektroden angelegte Spannung dargestellt. Dabei ist im oberen Bereich eine Hysterese erkennbar. Nach Wegnahme der Spannung bleibt der Kanal durch die Partikel blockiert. Dieses verzögerte Öffnen nach einer Sperrung des Kanals konnte auch bei anderen Versuchen beobachtet werden. Dabei war ein Zusammenhang zwischen der Zeit, in der der Kanal durch das Anlegen der Spannung gesperrt wurde, und der Zeit, bis der Kanal nach Wegnahme der Spannung wieder frei war, zu erkennen. Die Verwendung von Wechselspannung führte nicht zu einem sofortigen Öffnen des Kanals. Daher ist eine anhaltende Polarisierung der Partikel oder ähnliche Effekte, wie eine elektrische Aufladung von Teilen des Versuchsaufbaus, unwahrscheinlich. Dies lässt vermuten, dass der Effekt eine mechanische Ursache hat. Durch den Druck in der ERF werden die Partikel zusammengedrückt, sodass diese den Kanal noch einige Zeit nach Wegnahme der Spannung verstopfen. In Abb. 4.18 ist der Verlauf des Differenzdrucks über der angelegte Spannung während eines Versuchs dargestellt. Dabei wurde die gleiche Spannungsrampe durchfahren, wie sie in Abbildung 4.17a dargestellt ist. Der Druck in der ERF ist dabei jedoch größer, sodass der Kanal nicht gesperrt wird. Dort ist keine Hysterese vorhanden.



(a) Versuchsablauf zum Hystereseversuch



(b) Hysterese mit Sperren des Kanals

Abb. 4.17: Versuche zum Hystereseverhalten der ERF. In (a) ist der Versuchsablauf zum Hystereseverhalten mit einer Sperrung des Kanals dargestellt. Die Spannung wird kontinuierlich erhöht, bis der Kanal gesperrt ist und nach einer Wartezeit von 5 s wieder gesenkt. In (b) ist der Verlauf des Differenzdrucks über den Testkanal abgebildet. Im oberen Bereich bildet sich eine Hysterese aus, wenn der Kanal gesperrt ist.

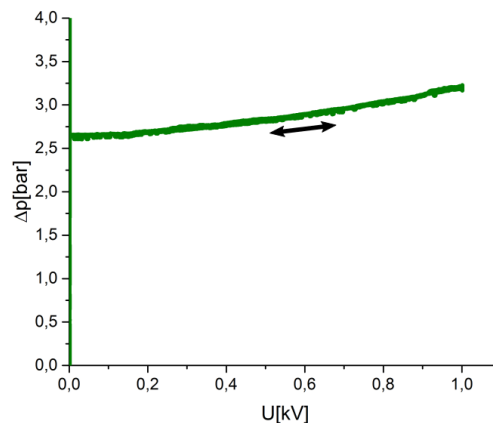


Abb. 4.18: Versuch zum Hystereseverhalten der ERF ohne Kanalsperrung. Die Spannung wurde kontinuierlich auf 1 kV erhöht und nach einer Haltezeit von 5 s wieder gesenkt. Dabei wurde der Kanal nicht gesperrt. Es ist keine Hysterese zu erkennen.

#### 4.2.6 Weitere Beobachtungen

In den Versuchen wurden elektrische Spannungen bis zu einigen kV verwendet. Da die elektrischen Ströme jedoch sehr klein sind, ist auch die elektrische Leistung, als Produkt von Spannung und Strom, gering. Zwischen den Versuchen wurde eine Sedimentation der Partikel beobachtet. Vor allem nach längerem Stillstand ist gut zu erkennen, wie sich die Partikel am Boden der Schläuche und den eingebauten Komponenten ablagerten (s. Abb. 4.19a). Nach kurzem Durchströmen stellte sich jedoch schnell eine homogene Mischung ein. Ebenfalls lagerten sich vermehrt Partikel in Toträumen ab, die zwar von der ERF befüllt waren, aber nur wenig bis gar nicht durchströmt wurden. Dies kam vor allem an Verbindungsstücken und Ventilen vor. Um die Sperrung des Kanals nach Wegnahme der Spannung durch die Partikel besser zu verstehen (s. Abschnitt 4.2.5), wurden die Partikel der verwendeten ERF mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) detaillierter beobachtet (s. Abb. 4.19b). Die Größe der kugelförmigen Partikel variiert stark. Die Durchmesser der meisten Partikel liegen in einem Bereich von  $1\ \mu\text{m}$  bis  $20\ \mu\text{m}$ . Durch diese starke Streuung der Partikeldurchmesser wird eine mechanisches Verkeilen der Partikel begünstigt.

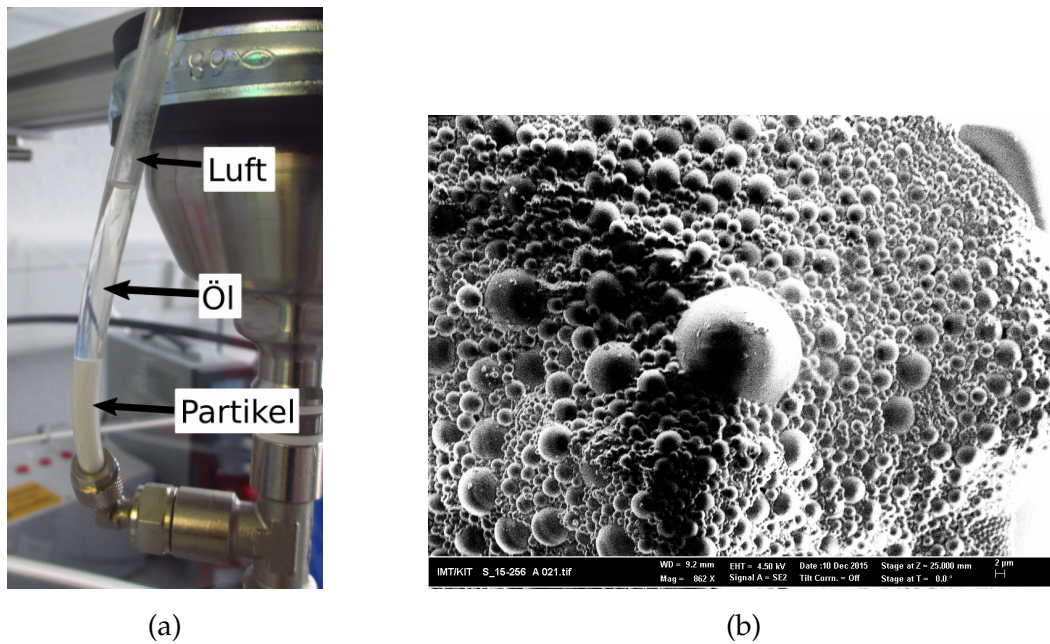


Abb. 4.19: Aufnahmen der ERF: (a) Sedimentierte Partikel in einem Schlauch. (b) REM-Aufnahme der Partikel.

### 4.3 Fazit

Für einen ER-Ventilaktor sollte geprüft werden, ob ein Kanal durch den ER-Effekt gesperrt werden kann. Dies konnte in den Versuchen in einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt demonstriert werden. Dieser ist für einen Aktor gut geeignet, da dieser mit vielen gängigen Fertigungstechniken gut herstellbar ist und sich ein homogenes E-Feld erzeugen lässt. Aus den in diesem Kapitel gezeigten Versuchen zur Charakterisierung des Schaltverhaltens können Erkenntnisse zum Aufbau eines ER-Aktors abgeleitet werden. Die Versuche zu den Elektrodengeometrien zeigen, dass sowohl die Elektrodenlänge als auch der Elektrodenabstand einen signifikanten Einfluss auf die zum Sperren des Kanals benötigte Spannung haben. Auf den maximal möglichen Druck, bei dem der Kanal noch gesperrt werden kann, hat besonders die Elektrodenlänge einen großen Einfluss. Durch Versuche in einem Temperaturbereich von 5 °C bis 60 °C wurde gezeigt, dass das Sperren des Kanals auch außerhalb der Raumtemperatur möglich ist. Zum Problem könnte das verzögerte Öffnen des Kanals werden, wie bei den Versuchen zur Hysterese zu erkennen ist. Damit hierdurch das Schaltverhalten eines Ventils nicht negativ beeinflusst wird, können in weiteren Versuchen konstruktive Maßnahmen, wie ein größerer Kanal, untersucht oder geeignete Betriebsstrategien entwickelt werden. Dies könnte beispielsweise sein, den Kanal nie vollständig zu sperren, sodass stets ein kleiner Restdurchfluss erhalten bleibt. So sind die Partikel immer in Bewegung und müssen sich nach Wegnahme der Spannung nicht erst lösen. Da die elektrischen Ströme sehr niedrig sind, ist trotz hoher Spannungen auch die benötigte elektrische Leistung gering (< 100 mW).



Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde, kamen verschiedene Materialien für die Elektroden zum Einsatz. Auf den ER-Effekt wurde dabei kein Unterschied festgestellt. Aufgrund der Sedimentation und der Ablagerung der Partikel in Toträumen sollte beim Design eines ERF-Aktors darauf geachtet werden, dass alle Bereiche gut durchströmt werden. Dadurch wird eine Ablagerung der Partikel im Betrieb vermindert und nach längerem Stillstand kommt es zu einem schnellen Vermischen von Öl und Partikeln.



# 5 Aufbau eines einzelnen Ventils

## 5.1 Ventilkonzept

Bevor auf den Aufbau des Ventils genauer eingegangen wird, soll zunächst das Ventilkonzept, welches dieser Arbeit zugrunde liegt, näher erläutert werden. Dieses ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die wesentlichen Bestandteile sind ein Kanal für die ERF mit Elektroden, ein Ventilsitz mit Membran und Kanäle für das geschaltete Medium. Die ERF fließt durch den ERF-Kanal und das Medium, welches geschaltet werden soll, gelangt durch den Einlasskanal und den Ventilsitz in den Auslasskanal. Beide Medien sind am Ventilsitz durch eine elastische Membran voneinander getrennt (Abb. 5.1a). Durch das Anlegen einer Spannung an den Elektroden hinter der Membran sperrt der Kanal durch den ER-Effekt und der Druck an der Membran erhöht sich. Dadurch wird die Membran nach unten gedrückt, bis diese auf dem Ventilsitz aufliegt und diesen für das geschaltete Medium verschließt (Abb. 5.1b). Nach dem Wegnehmen der Spannung kann die ERF wieder fließen, der Druck an der Membran sinkt und die Membran kann in den Ausgangszustand zurückkehren.

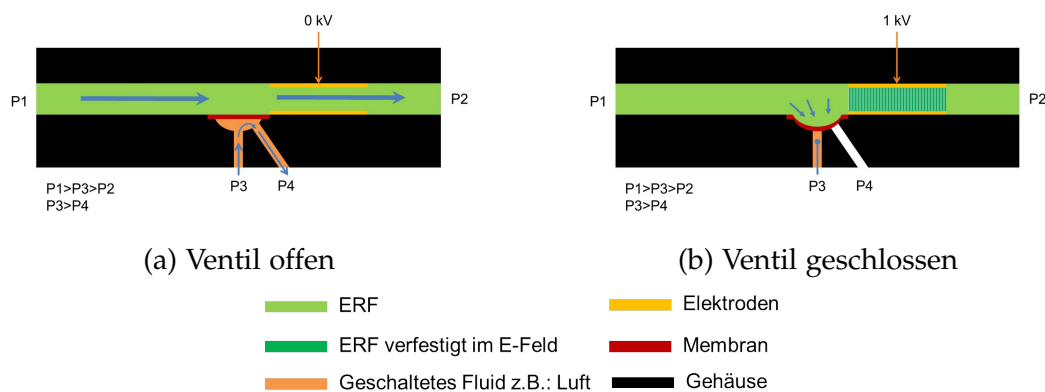


Abb. 5.1: Prinzipskizze des Ventilkonzepts. (a) Die ERF kann durch den Kanal fließen und das Ventil ist offen. (b) Der Kanal wird durch den ER-Effekt gesperrt. Der Druck über der Membran steigt an, wodurch die ERF die Membran auf den Ventilsitz drückt. Der Ventilsitz ist somit verschlossen und das Medium kann nicht mehr fließen.

## 5.2 Ventilaufbau

Vor der Entwicklung einer Ventilmatrix wurde ein einzelnes Ventil aufgebaut, um das grundlegende Prinzip zu testen. Der Gesamtaufbau des Ventils, bestehend aus sechs Lagen, ist in der Schnittdarstellung in Abbildung 5.2 dargestellt. Der Kanal für die ERF ist in die Kanalplatte eingearbeitet und wird durch die Deckelplatte verschlossen. In dieser sind auch die Schraubanschlüsse zur Verbindung mit den Schläuchen für die ERF-Zu- und Ableitungen eingeschraubt. Die Elektroden befinden sich in der Kanalplatte am Boden des ERF-Kanals und in der Deckelplatte über dem Kanal. Unterhalb der Ventilplatten befindet sich die Mediumsplatte mit den Zu- und Abflusskanälen für das Medium, welche mit der Bodenplatte verschlossen werden. Der Ventilsitz mit Membran ist in die Kanalplatte integriert. Dieser ist vergrößert in der Abbildung 5.3 zu sehen. Die Kanäle für das Medium sind über zwei Bohrungen mit dem Ventilsitz verbunden und die Schnittstelle wird durch O-Ringe abgedichtet. Über die obere und die untere Befestigungsplatte werden über Schrauben der Ventil- und der Mediumteil zusammengepresst und der gesamte Aufbau auf dem Prüfstand fixiert.

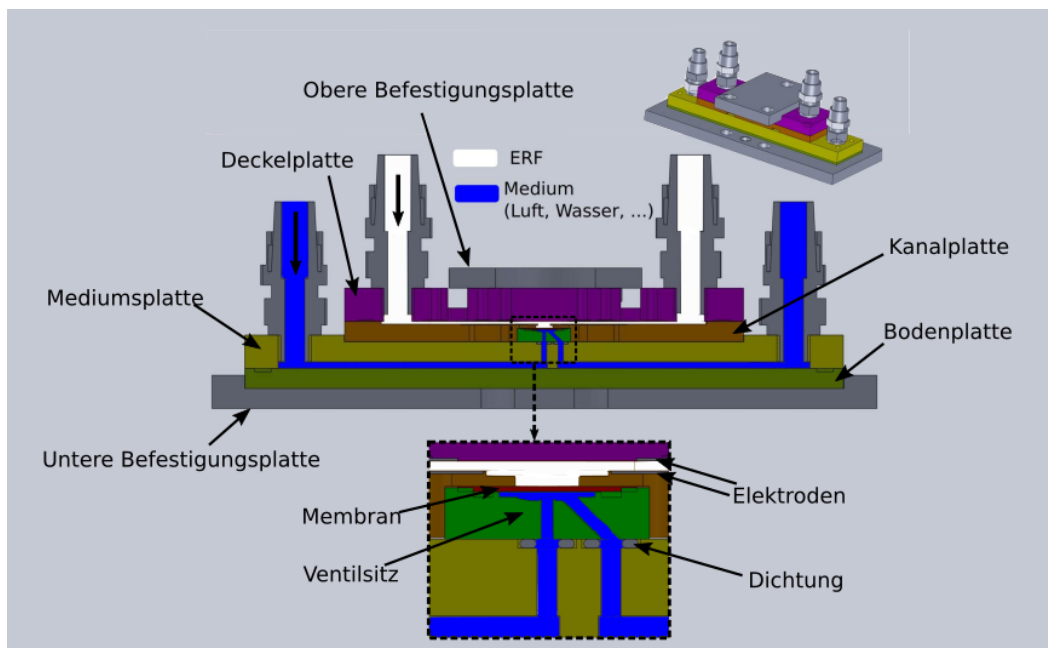


Abb. 5.2: CAD-Modell des Ventils. Oben: Schnittansicht des gesamten Ventils; Unten: Detailansicht des Ventilsitzes.

Die sechs Platten und der Ventilsitz wurden durch Mikrofräsen hergestellt. Um dem Problem mit sich ablösenden Elektroden entgegenzuwirken, bestehen diese aus einer  $100\ \mu\text{m}$  dicken Metallfolie. An den Kanalwänden befinden sich kleine Aussparungen, in die die Metallfolie eingeklebt wird. Kanalplatte und Deckelplatte sind, wie auch die Mediums- und die Bodenplatte, mit einem UV-aushärtendem Klebstoff verbunden. Dieser wird, wie bei dem

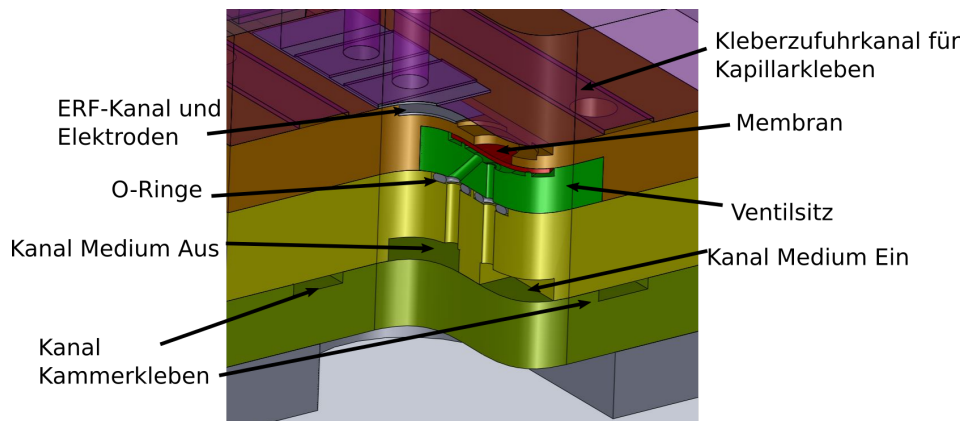


Abb. 5.3: Schnittansicht des Ventilsitz. Weiterhin sind fünf der sechs Bauteillagen zu erkennen.

ERF-Testchip, durch das Kapillarklebeverfahren aufgebracht. Die Platten der Mediumsseite sind mit Schrauben an dem Ventil befestigt und die Schnittstelle zum Ventilsitz ist mit O-Ringen gedichtet. Ein Foto des auf dem Prüfstand eingebauten Ventils ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

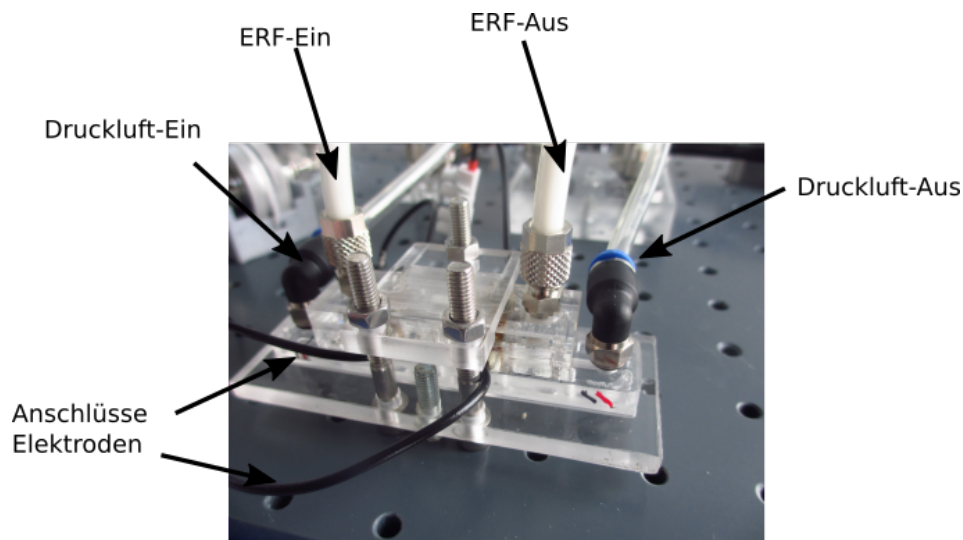


Abb. 5.4: ERF-Ventil auf dem Versuchsstand montiert.

## 5.3 Schaltverhalten eines Einzelventils

Die Durchführung der Ventiltests erfolgte auf dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Prüfstand. Dabei kam Druckluft als geschaltetes Medium zum Einsatz. Zur Regelung und Überwachung wurde der Versuchsstand mit einem zweiten Kreislauf für Druckluft erweitert. In

Abbildung 5.5 ist ein Ausschnitt aus dem Fluidschaltplan mit den wichtigsten Elementen dargestellt. Dieser besteht aus einem Teil für die ERF und einem für die Druckluft. Vor dem ERF-Ventil befindet sich ein Magnetventil durch das der Zufluss der ERF gestoppt werden kann. Der Druck der ERF wird über einen Drucksensor vor dem Ventil überwacht. Der Teil für die Druckluft enthält einen Druckregler (vor dem Ventil) und einen Drucksensor (hinter dem Ventil). Zum Testen kann so vor dem Ventil ein Druck eingestellt und anhand des Drucks hinter dem Ventil der Schaltzustand abgelesen werden. Hinter dem Drucksensor befindet sich noch eine Drossel. Ohne diese wäre die Druckänderung hinter dem Ventil sehr gering und nur schwer von dem Umgebungsdruck zu unterscheiden.<sup>1</sup>

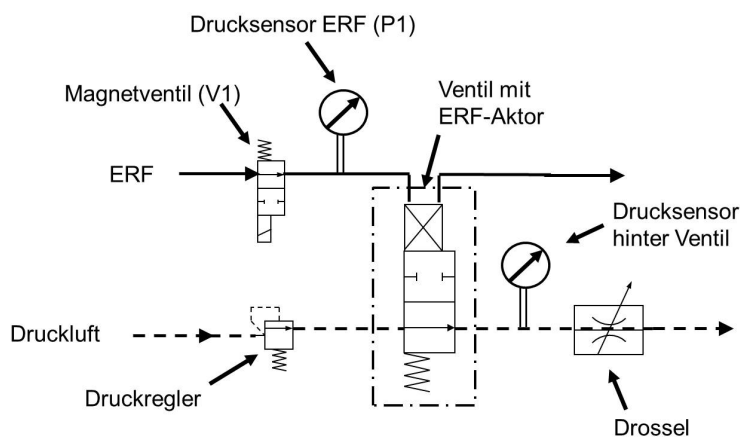


Abb. 5.5: Ausschnitt aus dem Fluidschaltplan für die Versuche mit dem Einzelventil. Die ERF-Leitung ist als durchgezogene Linie und die Mediumsleitung als gestrichelte Linie dargestellt.

In Abbildung 5.6 sind die aufgezeichneten Messdaten beim Schließen des Ventils zu sehen. Dargestellt ist der zeitliche Druckverlauf der ERF und des Mediums sowie die elektrische Spannung. In diesem Beispiel wird der Druck der ERF auf 4 bar geregelt. Zum Schalten wird eine elektrische Spannung von 0,8 kV an die Elektroden angelegt. Auf der Mediumsseite ist ein Druck von 3 bar vor dem Ventil eingestellt. Bevor die Spannung an den Elektroden angelegt ist, wird hinter dem Ventil ein Druck von 2,8 bar gemessen. Nachdem die Spannung an den Elektroden angelegt ist, schließt das Ventil und der Druck hinter dem Ventil fällt ab, bis er Umgebungsdruck erreicht. Dieser verringert sich langsam, da die in dem Volumen zwischen

<sup>1</sup>Ist das Ventil gesperrt, herrscht hinter dem Ventil Umgebungsdruck. Wird das Ventil durchströmt, ergibt sich der Druckunterschied hinter dem Ventil (vom Ventilsitz zur Umgebung) durch den Strömungswiderstand (vgl. Kapitel 2.1.1). Wird die Druckluft über eine kurze Leitung direkt in die Umgebung abgeleitet, ist dieser sehr gering. Durch den Einsatz einer Drossel wird der Strömungswiderstand erhöht. Somit ergibt sich eine gut messbare Druckdifferenz. Nachteilig ist, dass die Luft, welche sich zwischen dem Ventil und der Drossel befindet beim Schließen des Ventils erst entweichen muss. Dadurch fällt auch der Druck langsam ab.

Ventil und Drossel komprimierte Luft erst über die Drossel entweichen muss.

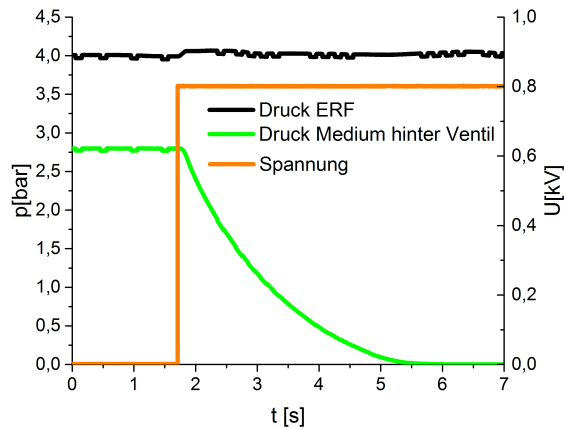


Abb. 5.6: Druck- und Spannungsverlauf beim Schließen des Einzelventils. Nach Anlegen einer Spannung von 0,8 kV an die Elektroden fällt der Druck des Mediums hinter dem Ventil auf Umgebungsdruck ab. Der Druck des Mediums vor dem Ventil betrug 3 bar.

Für die Membranbewegung sind drei verschiedene Kräfte verantwortlich (s. Abb. 5.7). Von oben wirkt der Druck der ERF und drückt die Membran in die Richtung des Ventilsitzes. Dem entgegen wirkt der Druck des Mediums. Bei diesem muss der Schaltzustand des Ventils berücksichtigt werden. Ist das Ventil offen, drückt das Medium auf die gesamte Fläche der Membranunterseite. Bei geschlossenem Ventil wird nur ein kleiner Teil der Fläche mit Druck beaufschlagt. Zudem wirken Kräfte aufgrund der elastischen Verformung der Membran, die diese in den nicht-ausgelenkten Zustand zurückziehen. Damit das Ventil schließen kann, muss die Kraft der ERF größer sein als die Summe der Kräfte aus der Rückstellkraft der Membran und dem Druck des Mediums auf die gesamte Fläche. Beim Öffnen müssen die Membranrückstellkraft und die Kraft des Mediumdrucks auf die kleine Membranfläche zusammen größer sein als die Kraft durch den Druck der ERF.

Die Auslenkung ( $s$ ) der Membran kann mit der Gleichung 5.1 berechnet werden. [73] Als Druck ( $p$ ) kann der Differenzdruck zwischen ERF und Medium verwendet werden. Weitere Einflussgrößen sind der Radius der Membran ( $r$ ), die Querkontraktionszahl ( $\nu$ ) und der Elastizitätsmodul ( $E$ ) des Membranmaterials und die Dicke der Membran ( $h$ ). Ist die so berechnete Auslenkung größer als der Weg der Membran, bis diese auf dem Ventilsitz aufliegt, kann das Ventil schließen.

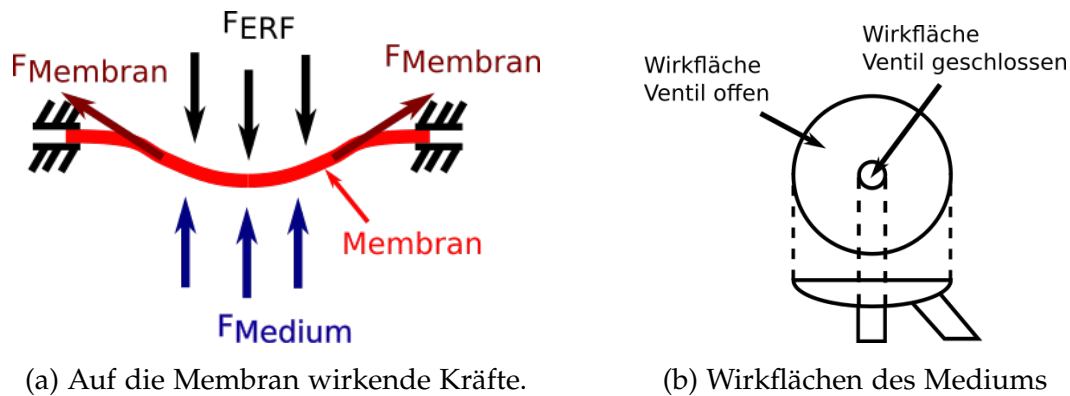
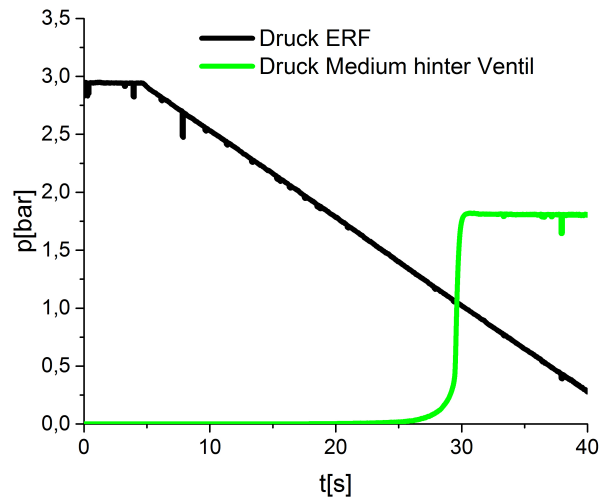


Abb. 5.7: (a) Darstellung der für die Membranbewegung relevanten Kräfte. (b) Unterschiedliche Flächen, auf die das Medium je nach Schaltzustand wirkt.

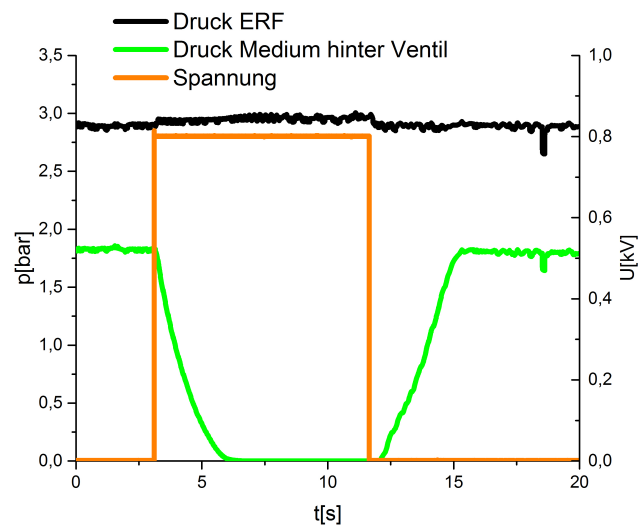
$$s = \frac{3}{16} \frac{p r^4 (1 - \nu^2)}{E h^3} \quad (5.1)$$

Wenn nach Wegnahme der Spannung an den Elektroden die Kraft durch den ERF-Druck größer ist als die Rückstellkraft der Membran und die Kraft des Mediumdrucks, bleibt das Ventil geschlossen. Anhand eines Beispiels mit 2 bar Luftdruck und 3 bar ERF-Druck ist dies in Abbildung 5.8a zu sehen. Der Druck in der ERF liegt zu Beginn bei 3 bar und wird dann kontinuierlich mit einer Rate von  $0,075 \frac{\text{bar}}{\text{s}}$  abgesenkt. Der Druck des Mediums hinter dem Ventil beträgt anfangs 0 bar. Das Ventil ist geschlossen. Erst nachdem der Druck in der ERF auf etwa 1,2 bar gesunken ist, steigt der Druck hinter dem Ventil an und das Ventil ist geöffnet. Werden Lufteinlass und Luftauslass vertauscht, d. h. die Luftzuführung erfolgt über die schräge Bohrung im Ventilsitz, drückt die Luft auch im geschlossenen Zustand auf eine größere Fläche der Membran. So öffnet das Ventil ohne den Druck auf der ERF-Seite zu senken (s. Abb. 5.8b).





(a) Öffnen des Ventils durch Senken des Drucks in der ERF.



(b) Schließen und Öffnen des Ventils bei vertauschtem Mediumanschluss.

Abb. 5.8: Öffnungsverhalten des Einzelventils bei unterschiedlichen Betriebsmodi. (a) Nach Wegnahme der Spannung bleibt das Ventil geschlossen. Erst nach einer Senkung des Drucks in der ERF unter 1,2 bar fängt das Medium an zu fließen. (b) Werden die Mediumanschlüsse vertauscht, so wirkt der Mediumsdruck auf eine größere Fläche der Membran und das Ventil öffnet nach Wegnahme der Spannung.

Das Vertauschen der Mediumanschlüsse nützt nichts, wenn der Druck im Medium sehr gering ist. Dann ist die Kraft des Mediums auf die Membran weiterhin geringer als die Kraft durch die ERF und das Ventil bleibt geschlossen. Um das Ventil unabhängig vom Mediumdruck zu öffnen, muss die Rückstellkraft der Membran erhöht oder der Druck in der ERF beim Öffnen verringert werden. Letzteres kann durch ein zweites Elektrodenpaar erreicht werden, indem dieses im ERF-Kanal vor der Membran platziert wird. Wenn das Ventil geöffnet werden soll, kann dort durch das Anlegen einer Spannung das Nachfließen der ERF gestoppt werden. Dann fällt der ERF-Druck an der Membran auf den Druck am Ventilausgang ab. Dies wurde durch das Schalten des Magnetventils vor dem ERF-Ventil getestet (s. Abb. 5.9). Hier beträgt der Druck in der ERF 5 bar und das Medium wurde vor dem Ventil auf 4 bar geregelt. Die Spannung beträgt am Anfang 0 V und das Magnetventil ist offen. Nach dem Anlegen der Spannung fällt der Druck des Mediums hinter dem Ventil auf Null ab. Das Ventil ist somit geschlossen. Zum selben Zeitpunkt, wie die Spannung wieder auf Null gesenkt wird, wird das Magnetventil geschlossen. So kann keine ERF mehr nachfließen und der ERF-Druck über der Membran fällt sofort ab. Durch das Ansteigen des Mediumdrucks hinter dem Ventil wird erkennbar, dass das Ventil öffnet.

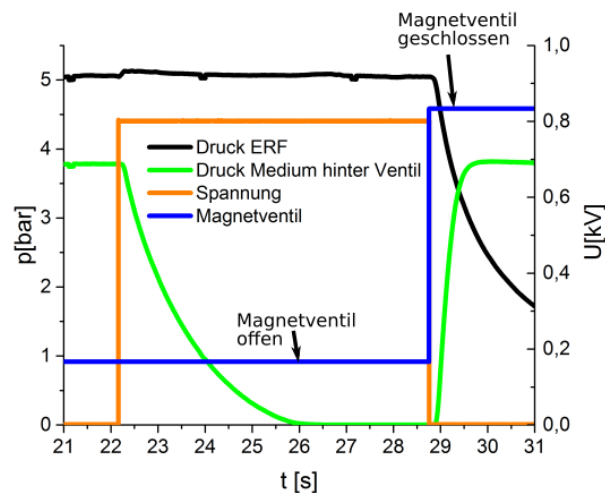
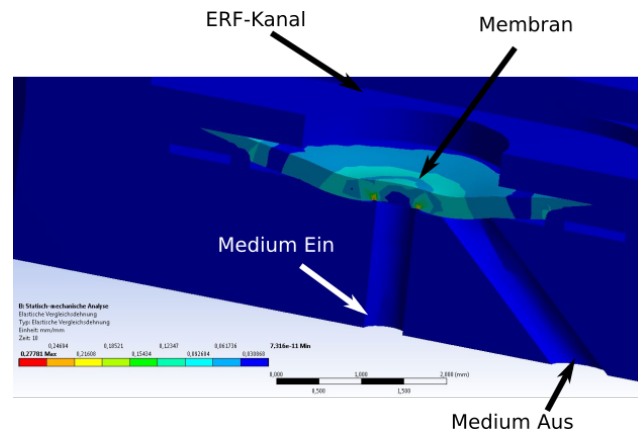
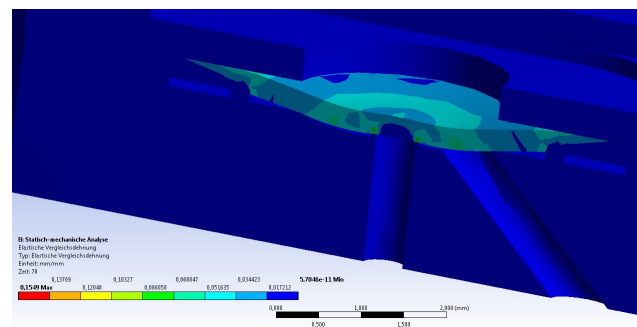


Abb. 5.9: Schließ- und Öffnungsverhalten des Ventils bei vorgeschaltetem Magnetventil. Nach dem Anlegen der Spannung an den Elektroden schließt das Ventil und der Druck im Medium hinter dem Ventil sinkt. Wird die Spannung wieder weggenommen, öffnet das Ventil und die Luft kann wieder fließen, wodurch der Mediumdruck hinter dem Ventil ansteigt.

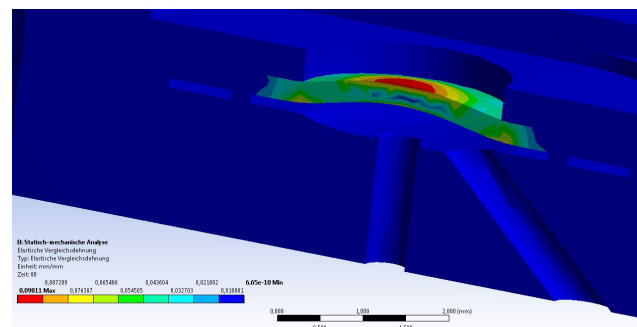
Formel 5.1 erlaubt es die freie Verformung der Membran zu berechnen. Damit lässt sich eine Aussage treffen, ob die Membranauslenkung ausreicht, damit das Ventil schließt. In der Praxis ist noch die Interaktion der Membran mit dem Ventilsitz zu beachten. Eine interessante Stelle ist dabei die Dichtfläche um die Einlassbohrung. In einer FEM-Simulation wurde daher das Ventil abgebildet und die mechanische Verformung der Membran mit dem Programm *Ansys* simuliert. In dieser ist die gesamte ERF-Seite der Membran mit einem Druck belastet worden. Die Fläche, auf die der Druck der Luft wirkt, wurde während der Simulation an den Kontakt der Membran mit dem Ventilsitz angepasst. In Abbildung 5.10 sind Ausschnitte aus einer Simulation dargestellt, in der das weiter oben beschriebene Verhalten des Versuchs aus Abbildung 5.8a nachgestellt wurde. Auf die ERF-Seite der Membran wirkt ein konstanter Druck von 3 bar und auf der Mediumsseite ein Druck von 2 bar. Dadurch wird die Membran auf den Ventilsitz gedrückt. Anschließend wirkt der Druck des Mediums nur noch auf die Fläche innerhalb der Einlassbohrung (Abb. 5.10a). Dann wurde in der Simulation der Druck auf der ERF-Seite schrittweise gesenkt. In Abb. 5.10b beträgt der ERF-Druck 1,2 bar und die Membran liegt noch auf dem Ventilsitz an. Im nächsten Schritt bei 1 bar ERF-Druck (Abb. 5.10c) liegt die Membran nicht mehr auf dem Ventilsitz auf und das Ventil ist geöffnet.



(a) Druck durch ERF: 3 bar



(b) Druck durch ERF: 1,2 bar



(c) Druck durch ERF: 1 bar

Abb. 5.10: FEM-Simulation der Membranverformung durch die Drücke der ERF und der Luft. Der Druck von der ERF wurde von 3 bar schrittweise gesenkt, während der Druck durch das Medium konstant 2 bar betrug. Die Farben markieren die Dehnung.

## 5.4 Fazit

Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Ventil mit einem elektrorheologischen Antrieb war es möglich, Druckluft erfolgreich zu schalten. So konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Ventilkonzept funktioniert. Um das Öffnen des Ventils zu verbessern, sollte ein Nachfließen der ERF verhindert werden. Dies kann über ein zweites Elektrodenpaar im ERF-Kanal vor der Membran geschehen. Dies wurde durch ein Magnetventil vor dem ERF-Kanal getestet, wodurch das Ventil einen größeren Druckbereich schalten konnte. In weiteren Ventilen sollte daher ein zweites Elektrodenpaar vor der Membran platziert werden (s. Abb. 5.11). Die Membranverformung wurde sowohl mit einer analytischen Formel, als auch durch eine FEM-Simulation berechnet und die Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen verifiziert. Diese Berechnungen können die Auslegung der Membran und die Gestaltung des Ventilsitzes bei weiteren Ventilen unterstützen. Um das Öffnungsverhalten des Ventils zu verbessern sollte die Membransteifigkeit erhöht werden. Dies kann durch ein Membranmaterial mit einem höheren E-Modul, einem kleineren Membrandurchmesser oder einer dickeren Membran geschehen.

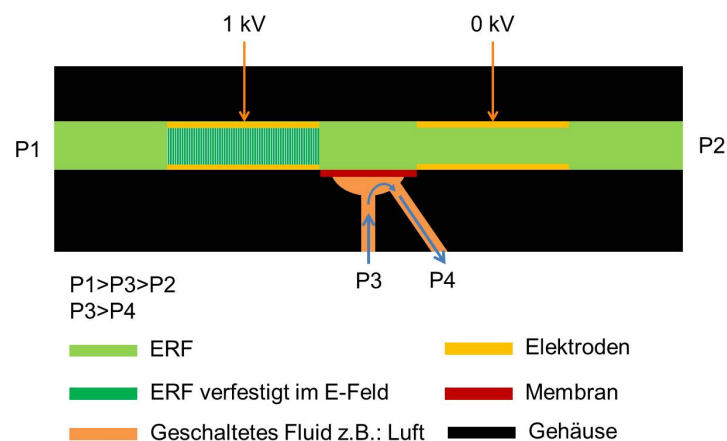


Abb. 5.11: Prinzipskizze des Ventilkonzepts mit zwei Elektroden. Soll das Ventil offen sein, wird der Zufluss der ERF durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an das Elektrodenpaar vor dem Ventilsitz gestoppt.



# 6 Ventilmatrix

## 6.1 Konzept

Im Vergleich zu einem konventionellen Ventil, beispielsweise mit einem elektromagnetischen Antrieb, ist der technische Mehraufwand für den ERF-Kreislauf mit Pumpe, Druckregelung, Leitungen, etc. größer. In einer Matrix mit mehreren Ventilen werden die oben genannten Komponenten für den ERF-Kreislauf jedoch nur einmalig für alle Ventile benötigt, sodass dieser Mehraufwand für eine Ventilmatrix akzeptabel ist.

Ein einzelnes Ventil besteht im Wesentlichen aus einem Kanal mit Elektroden und dem Ventilsitz mit Membran und kann somit sehr flach sein. Würde man viele Ventile in einer Ebene anordnen, bekommt man eine sehr flache und große Platte. Werden die Ventile um  $90^\circ$  gekippt, kann man sie dichter packen. Allerdings ist in diesem Fall die Fluidleitung und Dichtung zu einer Verteilerplatte aufwendiger. Stapelt man die Ventile hingegen übereinander und verbindet diese mit einer Verteilerplatte durch senkrechte Bohrungen, so können diese ohne großen Aufwand sehr kompakt angeordnet werden (s. Abb. 6.1). Konstruiert man den Ventilstapel so, dass die Ventilein- und Ventilausgänge mit der Stapelunterseite verbunden sind, kann man durch verschiedene Anschlussplatten unterschiedliche Verschaltungen erreichen. In Abbildung 6.2 ist das Prinzip des Ventilstapels detaillierter dargestellt. In jeder Ventilebene befinden sich drei Ventile. Über die Verteilerplatten und senkrecht zu den Ebenen verlaufenden Kanäle sind alle Ventilein- und Ventilausgänge mit der Stapelunterseite verbunden. Dort befinden sich die Anschlussplatten für das Medium. Durch diesen Aufbau müssen für verschiedene Verschaltungen der Ventile nur die Anschlussplatten geändert werden. In der Abbildung 6.2a wird ein Medium auf neun Ausgänge verteilt. Durch andere Anschlussplatten könnten z. B. auch drei verschiedene Fluide auf drei Ausgänge geschaltet werden (s. Abb. 6.2b).

Zum Betreiben der ERF-Antriebseinheit werden weitere Komponenten benötigt. Dies ist zum einen eine Pumpe für die ERF und eine Möglichkeit den Druck zu regeln. Zudem muss eine Hochspannung auf die Elektroden geschaltet werden. Dazu kann in einer elektronischen Schaltung eine Versorgungsspannung der Matrix in eine Hochspannung gewandelt werden. Diese Hochspannung kann mit Relais oder Transistoren auf die Elektroden geschaltet werden.

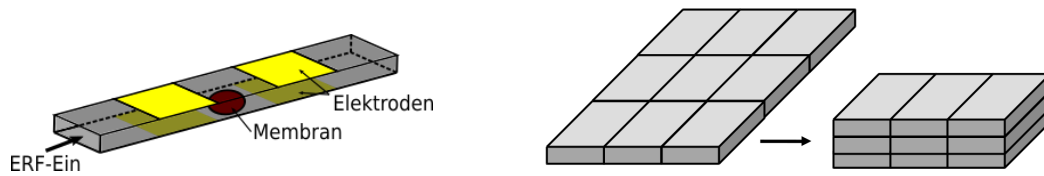
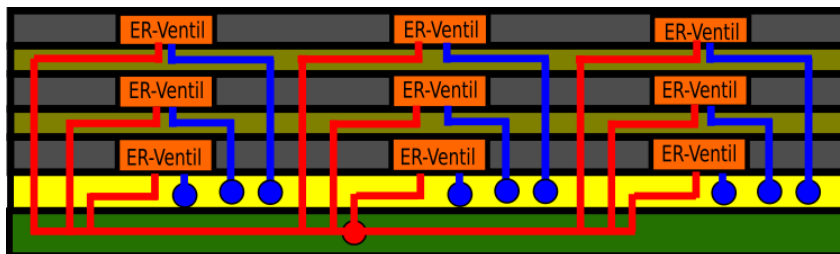
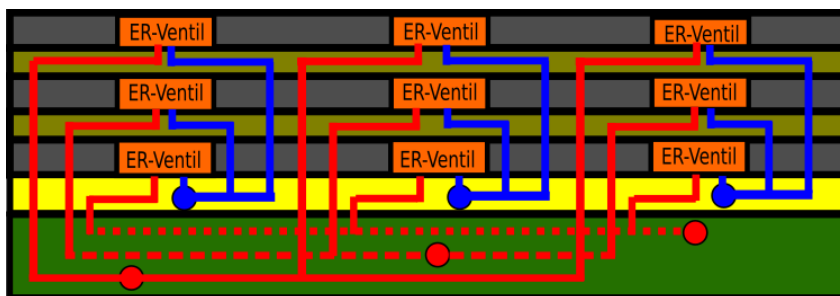


Abb. 6.1: Mögliche Anordnungen der Ventile in einer Matrix. Durch ein Stapeln der Ventile könne diese kompakter angeordnet werden.



(a) Ein Medium verteilt auf 15 Ausgänge.



(b) Drei Medien verteilt auf drei Ausgänge.

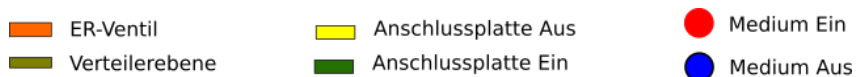


Abb. 6.2: Prinzip der einzelnen Ebenen eines Ventilstapels. Die einzelnen Ventilein- und Ventilausgänge sind über die Verteilerplatten und die dazu senkrechten Kanäle mit den Anschlussplatten verbunden. Durch verschiedenen Anschlussplatten lassen sich so unterschiedliche Verschaltungen erreichen.



Die Schaltelektronik für die einzelnen Elektroden werden für jedes Ventil benötigt. Daher ist es sinnvoll diese direkt in der Ventilebene unterzubringen. Somit führt nur eine Leitung, die unter Hochspannung steht, zu einer Ventilebene. Die restlichen Komponenten können auf dem Ventilblock und an dessen Seite untergebracht werden.

## 6.2 Aufbau einer Testmatrix

Für die Charakterisierung des Schaltens der Ventile in einer Matrix ist es sinnvoll, zuerst einen etwas weniger komplexen Aufbau zu verwenden. Dazu wurde die im Folgenden beschriebene Testmatrix mit drei Ventilen in einer Ebene entwickelt und aufgebaut. Für jedes Ventil gibt es zwei Anschlüsse für ein Medium, zwischen denen der Durchfluss geschaltet werden kann.

### 6.2.1 Mechanik und Fluidik

Für das Schalten eines einzelnen Ventils ist der ERF-Druck am Anfang und am Ende des Ventils entscheidend. Damit alle Ventile in einer Matrix ein möglichst identisches Schaltverhalten haben, sollten die Druckverhältnisse an jedem Ventil gleich sein. Durch eine Parallelschaltung der einzelnen Ventile zwischen einem Zu- und einem Ablaufkanal der ERF kann dies erreicht werden (s. Abb. 6.3). Wie in Kapitel 2.1.1 gezeigt wurde, hängt der Druckverlust in einer Leitung stark von dem Querschnitt der Leitung ab. Stellt man die Formel 2.12 nach der Druckdifferenz um (Formel 6.1) sieht man, dass für einen geringen Druckverlust in dem Kanal die Höhe ( $h$ ) des Kanals möglichst groß sein sollte. Daher ist die Höhe des Zuflusskanals viermal so hoch, wie die Höhe der ERF-Schaltkanäle der einzelnen Ventile. Dadurch herrscht im Einströmbereich der einzelnen Ventile jeweils annähernd der gleiche Druck. So ergeben sich drei gleich aufgebaute Ventilsegmente, bestehend aus dem ERF-Ventilkanal, den Elektroden, dem Ventilsitz mit Membran und einem Mediumzu- und Mediumablauf.

$$\Delta p = \frac{12Q\eta L}{h^3 b} \left[ 1 - \sum_{n, \text{odd}}^{\infty} \frac{192h}{n^5 \pi^5 b} \tanh \left( n\pi \frac{b}{2h} \right) \right]^{-1} \quad (6.1)$$

Der Aufbau und die Funktionsweise eines einzelnen Ventilsegments der Matrix ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die ERF wird über einen Verteilerkanal und senkrecht dazu angebrachte Bohrungen den einzelnen Ventilen zugeführt und kann über einen zweiten Verteilerkanal

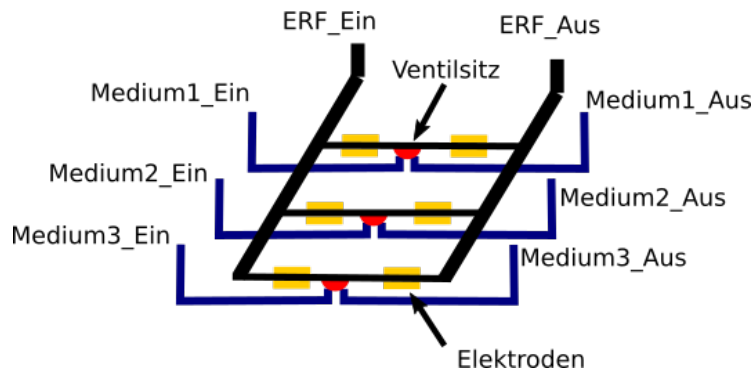


Abb. 6.3: Hydraulikprinzipskizze der Testmatrix. Die einzelnen ERF-Ventile sind in Parallelschaltung angeordnet. Dadurch wird erreicht, dass an den Ventilen jeweils der gleiche Druck herrscht, was für ein gleichmäßiges Schaltverhalten der einzelnen Ventile wichtig ist.

wieder abfließen. In der Abbildung verläuft dieser senkrecht zur Zeichenebene. Das Medium, welches geschaltet werden soll, fließt durch die Schlauchverbindung „Medium Ein“ in einen Kanal zwischen Matrixgrundplatte und Bodenplatte. Durch eine Bohrung am Ende des Kanals gelangt es zum Ventilsitz, welcher in einer Ebene darüber liegt. Bei geöffnetem Ventil fließt das Medium durch eine weitere Bohrung in einen zweiten Kanal zwischen Matrixgrundplatte und Bodenplatte zum Schlauchverbinder „Medium Aus“. Das Funktionsprinzip der einzelnen Ventile ist analog zu dem Konzept aus Kapitel 5. Wird die ERF durch die Matrix gepumpt, kann durch das Anlegen einer Spannung an dem Elektrodenpaar hinter der Membran der ERF-Kanal gesperrt werden. Dadurch steigt der Druck an der Membran an, wodurch diese sich nach unten bewegt und den Ventilsitz verschließt. In den ERF-Kanälen der Ventile befindet sich vor der Membran ein zusätzliches Elektrodenpaar. Eine dort angelegte Spannung verhindert ein Nachfließen der ERF und unterstützt so das Öffnen des Ventils.

Das zentrale Bauteil eines Ventils ist die Ventilgrundplatte. Diese ist in Abbildung 6.5 zusammen mit Membran und der Platine dargestellt. In der Ventilgrundplatte befindet sich der ERF-Schaltkanal, eine Elektrode und der Ventilsitz. Die Elektrode bedeckt den gesamten Boden des ERF-Schaltkanals. Während des Betriebs liegt sie permanent auf einem Potential von 0 V und wird im Folgenden Groundelektrode genannt. Im Unterschied zum Einzelventil aus Kapitel 5 besteht der obere Teil der Ventile aus einer Platine. Diese wird zum Verschließen des ERF-Schaltkanals verwendet. Eine Platine bietet zudem die Möglichkeit darauf die zum Betreiben eines Ventils notwendige elektronische Schaltung zu integrieren. Auf der Platinenunterseite sind für jedes Ventil zwei Elektroden aufgebracht, von denen sich im eingebauten Zustand eine vor und eine hinter der Membran befindet. Auf diese Elektroden wird die Hochspannung zugeschaltet, welche daher im Folgenden als Schaltelektroden bezeichnet werden.

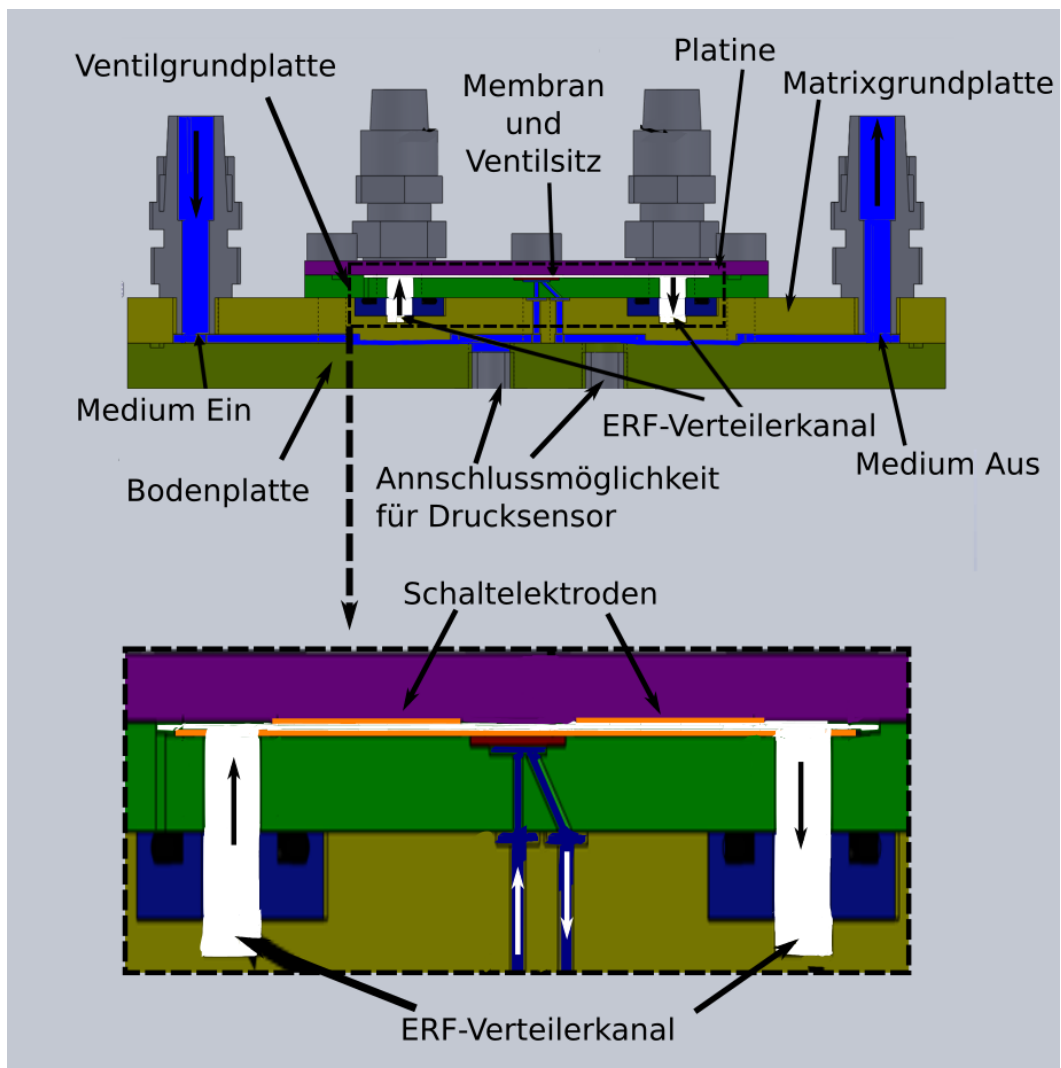


Abb. 6.4: Schnitt durch ein Ventil in der Testmatrix. Die Kanäle für die ERF sind weiß und die für das geschaltete Medium blau (oben) markiert. Unten: Ausschnitt mit orange markierten Elektroden. (nicht maßstabsgerecht)

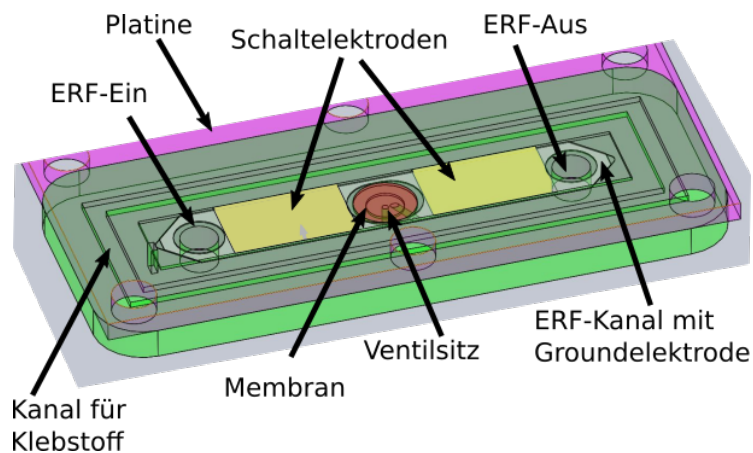


Abb. 6.5: CAD-Modell eines einzelnen Ventils. Die ERF fließt durch die Bohrung „ERF-Ein“ durch den ERF-Kanal an den Elektroden und der Membran vorbei zur Bohrung „ERF-Aus“. Unter der Membran befindet sich der Ventilsitz. Die Platine ist durch einen Klebstoff mit der Ventilgrundplatte verbunden.

Der Gesamtaufbau der Testmatrix ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Das oben beschriebene Ventilsegment aus Abbildung 6.4 wurde in der Matrix dreimal hintereinander verbaut. Die drei Ventile bestehen aus jeweils einer Ventilgrundplatte, einer Membran und einer gemeinsamen Platine. Diese enthält die sechs Schaltelektroden für alle drei Ventile. In der Abbildung ist auch der ERF-Verteilerkanal zu sehen, der die ERF vom Schlauchverbinder „ERF-Ein“ zu den einzelnen Ventilen leitet. Dieser ist durch die Kanalabdeckung verschlossen, in der sich Bohrungen zur Verbindung des ERF-Verteilerkanals und der Ventilgrundplatte befinden. Die Schlauchverbindungen für die ERF werden in einen Gewindeadapter geschraubt, welcher am anderen Ende der Kanalabdeckung angebracht ist.

Um den Schaltvorgang schnell messen zu können, soll der Druck des geschalteten Mediums hinter dem Ventil möglichst nahe am Ventilsitz gemessen werden. Gegenüber den Verbindungsbohrungen vom Ventilsitz zum Mediumkanal befinden sich daher in der Bodenplatte Gewindebohrungen, in die ein Drucksensor eingeschraubt werden kann. Damit sich der Messwert des Drucks deutlich vom Umgebungsdruck unterscheidet, wurde wieder eine Drossel verwendet. Zur Verringerung des Volumens zwischen Ventilsitz und Drossel und somit eine schnelle Druckänderung hinter dem Ventil, wurde die Drossel durch eine Verengung des Mediumkanals direkt hinter der Drucksensoranschlussbohrung in die Testmatrix integriert.

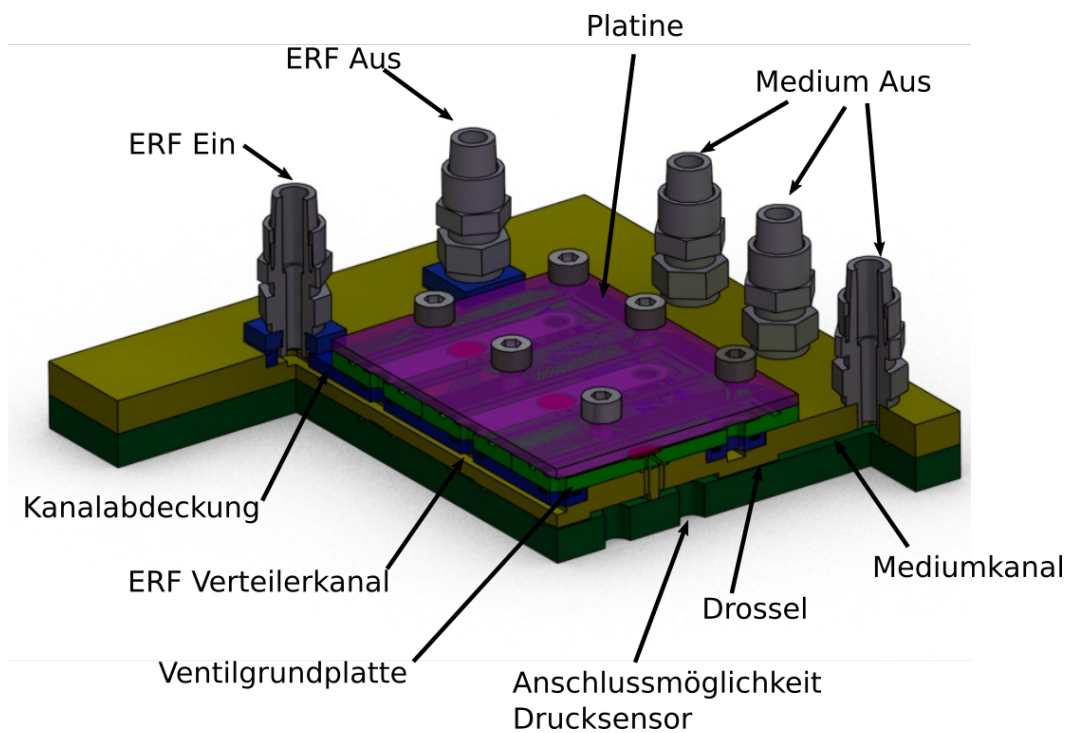
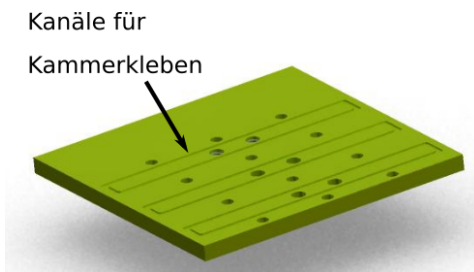
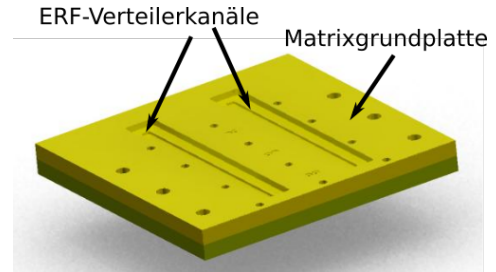


Abb. 6.6: Teilschnitt durch die Testmatrix mit drei Ventilen. An der linken geschnittenen Seite sind der ERF-Verteilerkanal und die Bohrungen zu den Ventilen zu erkennen. An der rechten Schnittseite sieht man den Kanal für das Medium mit der Drossel. Zu erkennen ist auch der Ventilsitz mit Membran und die darunter liegenden Anschlussmöglichkeiten für einen Drucksensor.

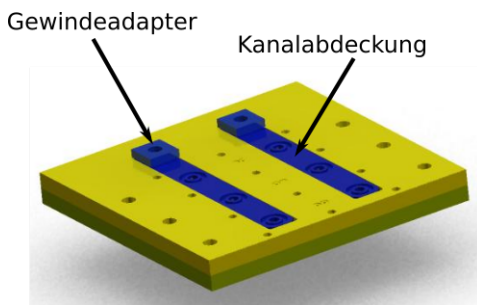
Die Bodenplatte besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA) und wurde durch Fräsen gefertigt (s. Abb. 6.7a). Die Matrixgrundplatte ist ebenfalls aus PMMA gefräst. Bodenplatte und Matrixgrundplatte sind miteinander verklebt (s. Abb. 6.7b). Die ERF-Kanalabdeckungen und die Gewintheadapter für die Schlauchverbinder der ERF sind durch Fräsen aus Polycarbonat (PC) hergestellt. Mittels Ultraschallschweißen erfolgte die Verbindung der beiden Bauteile, bevor diese in die Matrixgrundplatte eingeklebt wurden (s. Abb. 6.7c). Die Ventilgrundplatte mit den Kanälen für die ERF, dem Ventilsitz und der Groundelektrode ist durch Heißprägen aus Polycarbonat (PC) gefertigt. Die Groundelektrode ist durch Erodieren aus einer 100  $\mu\text{m}$  dicken Platte aus rostfreiem Stahl zugeschnitten. Diese wird zusammen mit einem Plättchen aus PC in das Abformwerkzeug gelegt und beim Abformvorgang in das Bauteil eingeprägt. Da das Erzeugen von sauberen Durchgangslöchern beim Abformen nur mit größerem Aufwand zu realisieren ist, werden die Bohrungen für den Zu- und Auslauf der Fluide sowie die Öffnung zur Kontaktierung der Elektrode nach dem Abformvorgang durchgebohrt. Damit sichergestellt ist, dass die Bohrungen an der richtigen Stelle sitzen, wird eine Bohrschablone verwendet. Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt das Einkleben der Membran (s. Abb. 6.7d). Nach dem Kontaktieren der Groundelektrode mit einem Kabel durch einen leitfähigen Klebstoff werden drei der so vorbereiteten Ventilgrundplatten auf die Platine geklebt (s. Abb. 6.7e). Auf dieser befinden sich auf der einen Seite die Schaltelektroden, welche auf der Rückseite kontaktiert werden können. Die Elektroden bestehen aus Nickel und sind mit einer Goldschicht überzogen. Die richtige Positionierung wird durch eine Klebevorrichtung erreicht, welche die Bauteile in der richtigen Position fixiert, bis der Klebstoff ausgehärtet ist. Anschließend werden die Kabel zum Anschließen der Elektroden auf die Kontaktstellen auf der Platinenrückseite gelötet. Nach dem Einlegen der O-Ringe zwischen Matrixgrundplatte und Ventilgrundplatte und zwischen Kanalabdeckung und Ventilgrundplatte wird der so entstandene Block aus drei Ventilen auf die Matrixgrundplatte geschraubt. In einem letzten Schritt erfolgt das Einschrauben der Schlauchverbindungen (s. Abb. 6.7f). Ein Foto der auf dem Prüfstand montierten Matrix ist in Abbildung 6.8 zu sehen.



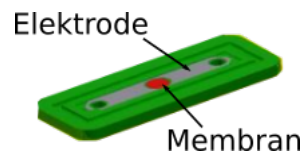
(a) Bodenplatte



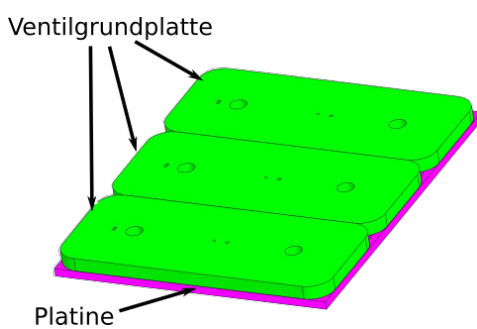
(b) Matrixgrundplatte



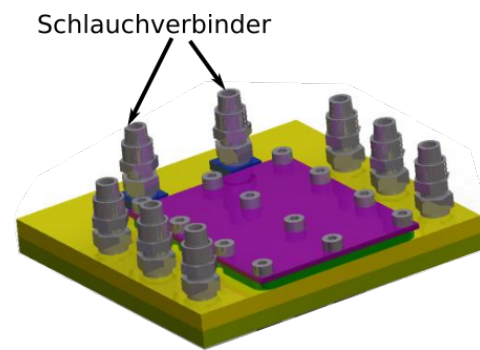
(c) Kanalabdeckung und Gewindeadapter



(d) Ventilgrundplatte mit Elektrode und Membran



(e) Platine



(f) Schlauchanschlüsse

Abb. 6.7: Montageschritte beim Aufbau der Testmatrix.

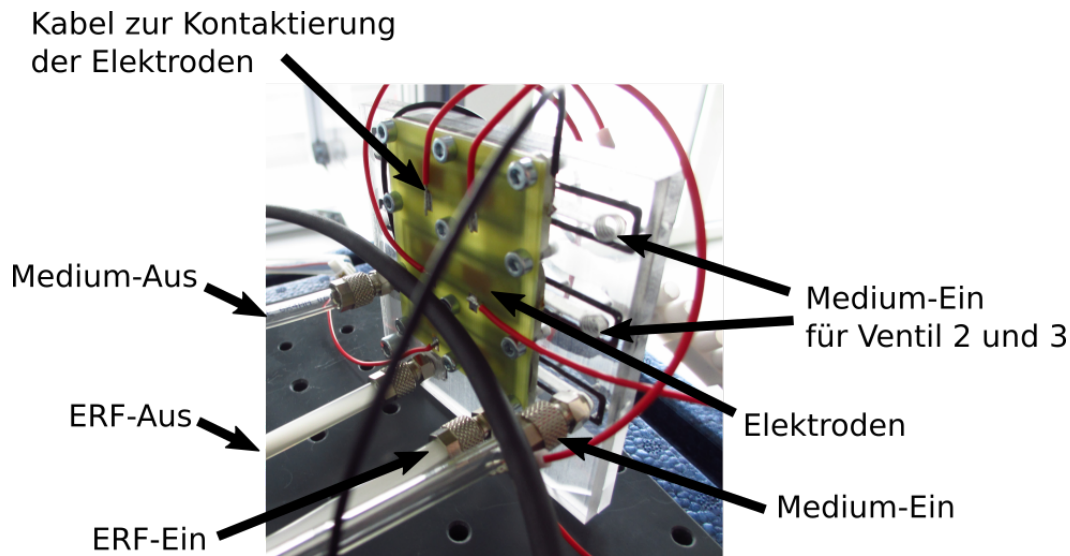


Abb. 6.8: Foto der Ventilmatrix auf dem Prüfstand.

### 6.2.2 Elektronische Schaltung zur Ansteuerung der Elektroden

Zum Ansteuern der Ventile wurde eine elektronische Schaltung entwickelt. Diese soll den Ausgang der Hochspannungsquelle nach Anlegen eines Schaltsignals von 5 V mit einer Elektrode verbinden. Der Schaltplan für zwei Elektroden ist in Abbildung 6.9 zu sehen. Der Ausgang der Hochspannungsquelle ist mit dem Eingang V3 verbunden und an den Eingang V2 ist eine Versorgungsspannung angeschlossen. Der GND-Anschluss ist mit 0 V verbunden. Das Schaltsignal von 0 V oder 5 V wird über die Eingänge V1.1 und V1.2 eingetragen. Zum Schutz der Bauteile, wie der D/A-Wandler, auf der Signalseite vor der Hochspannung sind die Signaleingänge durch einen Optokoppler vom Rest der Schaltung galvanisch getrennt. Beträgt das Eingangssignal  $V1.1 = 0\text{ V}$ , so ist der Transistor T1 nicht geschaltet und die Elektrode E1 nimmt das Potential der Hochspannung an. Wird der Eingang V1.1 auf 5 V gesetzt, so wird der Transistor T1 geschaltet und die Elektrode E1 wird mit GND verbunden. Über den zwischen V3 und Elektrode liegenden Widerstand R1.1 wird dabei das Potential abgebaut. Der Widerstand R1 ist sehr hochohmig ( $4,7\text{ M}\Omega$ ), weshalb die Verlustströme gering sind. Diese Schaltung wurde mehrfach in Parallelschaltung hintereinander auf eine Platine gelötet. Die Konstruktion der Matrix mit der Platine bietet zwar die Möglichkeit, dass die Steuerungselektronik auf der Platine montiert werden kann, jedoch wurde diese zu Testzwecken auf einer separaten Platine umgesetzt. So kann die elektronische Schaltung geändert werden, ohne ein neues Ventil zu fertigen.



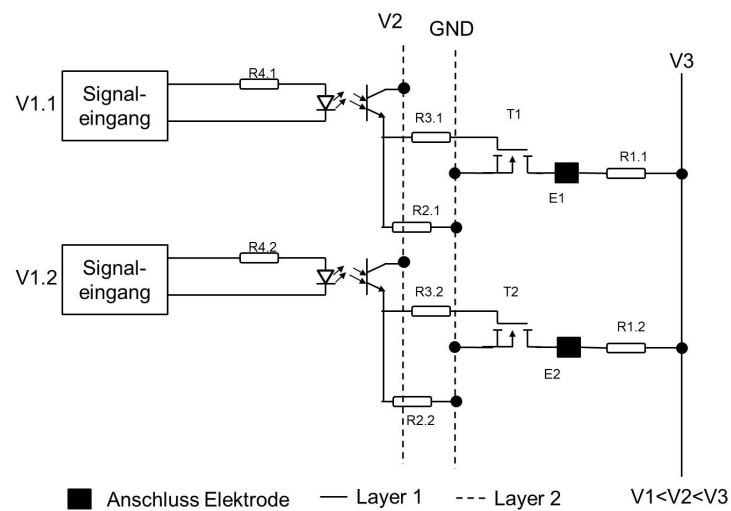


Abb. 6.9: Schaltplan der verwendeten Elektronik. V1: Schaltsignale; V2: Nieder-  
spannung; V3: Hochspannung

## 6.3 Versuche zum Schaltverhalten der Testmatrix

Bei den Versuchen zum Schaltverhalten der Ventilmatrix wurden verschiedene Varianten der Ansteuerung getestet und miteinander verglichen. Dabei standen folgende Einflussfaktoren im Vordergrund:

- Druck von ERF und Medium
- Schaltzustand der anderen Ventile (ob diese offen oder geschlossen für die ERF sind)
- Elektrodenansteuerung: nur die hintere Elektrode oder beide Elektroden eines Ventils
- Variation der elektrischen Spannung: konstante Spannung oder Absenkung nach Schaltvorgang

Die Versuche wurden auf dem in Kap. 4.1.2 beschriebenen Prüfstand durchgeführt. Als geschaltetes Medium wurde Druckluft verwendet und über einen Druckregler vor der Testmatrix eingestellt. Der Druck des Mediums wurde sowohl vor als auch hinter der Testmatrix aufgezeichnet. In Abb. 6.10 ist das Schalten eines Ventils der Testmatrix anhand der Druckverläufe des Mediums zu sehen. In dem Beispiel wurde Druckluft von 2 bar geschaltet. Der ERF-Druck vor der Matrix wurde dabei auf 4 bar geregelt und die elektrische Spannung zum Schalten betrug 1 kV. Um die Schaltzeit zu bestimmen, ist das Schaltsignal am Eingang der elektronischen Schaltung aufgezeichnet worden. Ist das Schaltsignal „Null“ ( $V1 = 5\text{ V}$ ), liegt die Spannung an der vorderen Schaltelektrode an und das Ventil ist offen. Ist das Schaltsignal „Eins“ ( $V1 = 0\text{ V}$ ), liegt die Spannung an der hinteren Schaltelektrode an und das Ventil schließt. Wird das Ventil geschaltet (Schaltsignal  $0 \rightarrow 1$ ), sinkt der Druck des Mediums hinter

dem Ventil. Wird zum Öffnen die Spannung auf die vordere Elektrode geschaltet (Schalt-signal 1  $\rightarrow$  0), steigt der Druck des Mediums hinter dem Ventil und das Ventil ist offen. Um die Wiederholbarkeit zu testen, wurde jeder Versuch mehrfach unter gleichen Bedingungen hintereinander durchgeführt. Die Auswertung der Schaltzeit erfolgte mit *Matlab*. Als einheitlichen Zeitpunkt, wann das Ventil als geöffnet oder geschlossen gilt, wurden eine Druckveränderung am Ventilausgang um 10% und 90% betrachtet. Im Folgenden wird jeweils der Mittelwert aus zehn hintereinander durchgeführten Messungen der 10%-igen Druckänderung für die Schaltzeit angegeben.

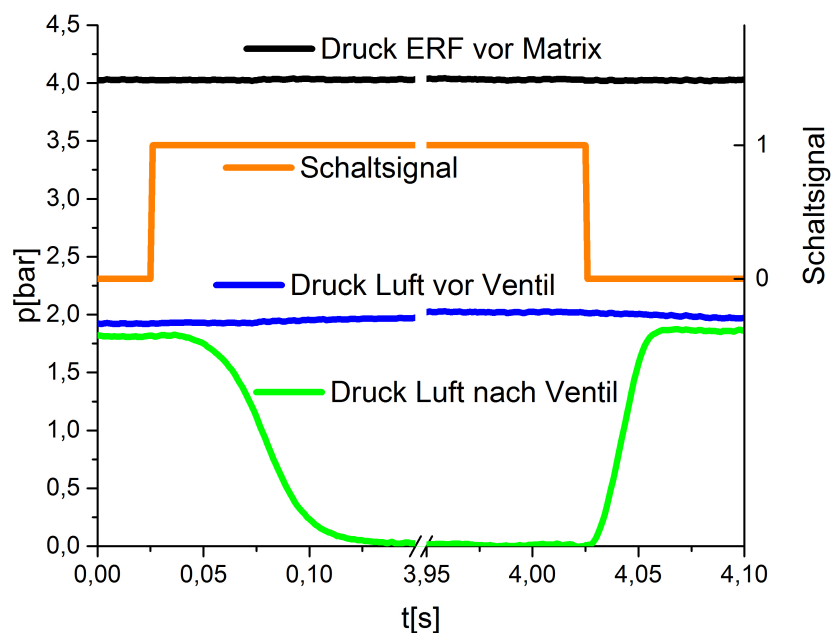


Abb. 6.10: Druckverläufe beim Schalten eines einzelnen Ventils der Ventilmatrix.

### 6.3.1 Einfluss des Drucks auf das Schaltverhalten

Entscheidend für das Schalten eines Ventils ist der Differenzdruck zwischen der ERF und dem Medium. Damit das Ventil schließt, muss der Druck in der ERF größer sein als der des Mediums, plus einem konstanten Anteil, der benötigt wird, um die Membran zu verformen. Ist die Druckdifferenz zwischen Medium und ERF größer, wird die Membran mit einer höheren resultierenden Kraft auf den Ventilsitz gedrückt. Auch strömt so die ERF schneller nach und führt insgesamt zu einem schnelleren Schließen des Ventils. In der Abbildung 6.11 sind vier Messungen der Schaltzeit bei unterschiedlichen Drücken gegenübergestellt. Die Balken geben jeweils den Mittelwert und die Fehlerbalken die Spanne zwischen maximalem und

minimalem gemessenen Wert an. Dabei wurden zum Schalten beide Elektrodenpaare des Ventils benutzt. Es ist gut zu erkennen, dass eine Erhöhung der Druckdifferenz zwischen ERF und Medium von 2 bar auf etwa 3 bar eine deutlich kürzere Schaltzeit zur Folge hat. Ebenso ist die Schaltzeit bei einer Verringerung des Differenzdrucks auf 1 bar wesentlich länger. Beim Öffnen ist dagegen kein Unterschied zu erkennen.

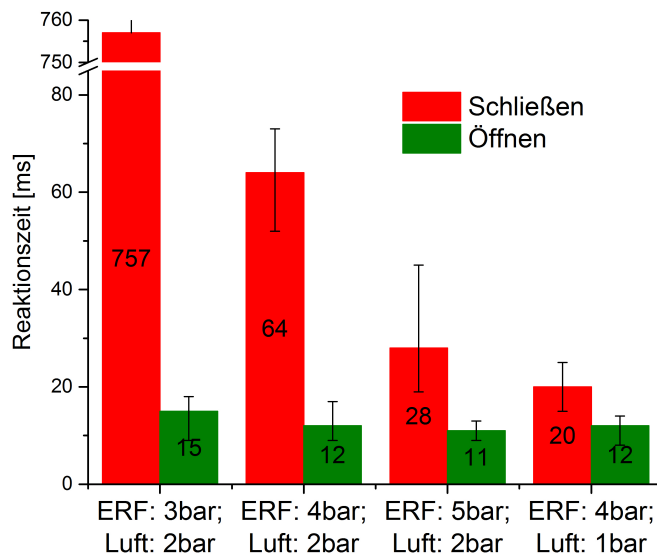


Abb. 6.11: Einfluss der Druckdifferenz zwischen ERF und Medium auf die Schaltzeit.

### 6.3.2 Elektrodenschaltung

Ein möglicher Einfluss auf das Schalten eines Ventils in der Matrix ist der Schaltzustand der Elektroden in den anderen Ventilen der Matrix. Ist der Durchfluss für die ERF durch die anderen Ventile gesperrt, so kann sich der Volumenstrom der ERF auf das geschaltete Ventil konzentrieren. In den Versuchen hat dies jedoch keinen Unterschied gemacht. Da der zur Verfügung stehende Volumenstrom deutlich größer ist als der Volumenstrom durch einen offenen ERF-Kanal, ist der Einfluss sehr gering. Wie in Abbildung 6.12 an den linken beiden gezeigten Messungen zu sehen ist, ist die gemessene Schaltzeit fast identisch. Die in dem Diagramm gezeigten Messungen wurden mit 4 bar ERF-Druck und 2 bar Luftdruck durchgeführt. Einen Einfluss hat hingegen der Schaltzustand der zweiten Elektrode in einem Ventil. Schaltet man die Elektrode vor dem Ventilsitz beim Öffnen des Ventils, so wird verhindert, dass ERF nachfließt. So kann sich der Bereich oberhalb der Membran schneller

leeren. Dadurch erreicht die Membran früher ihre Ausgangslage und das Ventil öffnet schneller (Abb. 6.12 rechter Balken (12 ms)). Wie zu erkennen, ist die Zeit zum Öffnen beim dritten Beispiel deutlich geringer, als bei den ersten beiden mit nur einer geschalteten Elektrode pro Ventil. Die Zeit zum Schließen des Ventils wird hingegen vergrößert. Dies liegt daran, dass bis zum Schaltzeitpunkt der ERF-Kanal vor der Membran gesperrt ist. Nach Wegnahme der Spannung müssen sich die Partikel erst lösen und wieder anfangen zu fließen.

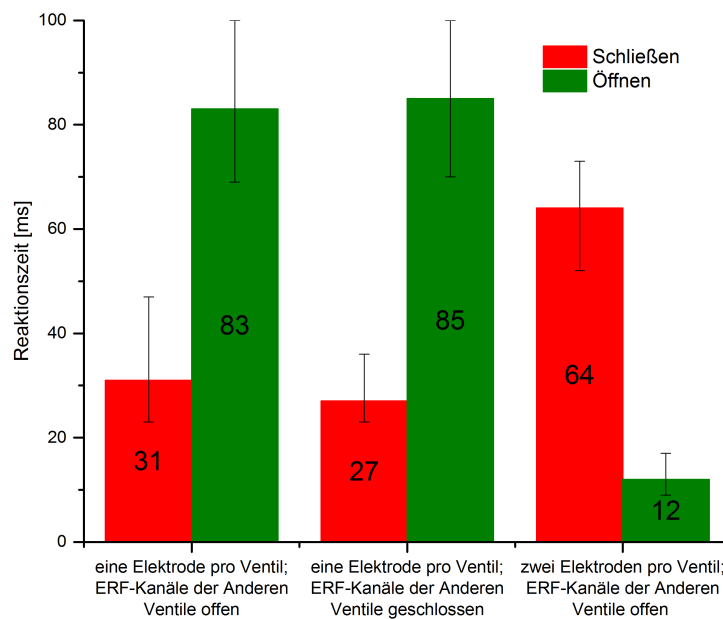


Abb. 6.12: Einfluss der Elektrodenansteuerung auf die Schaltzeit.

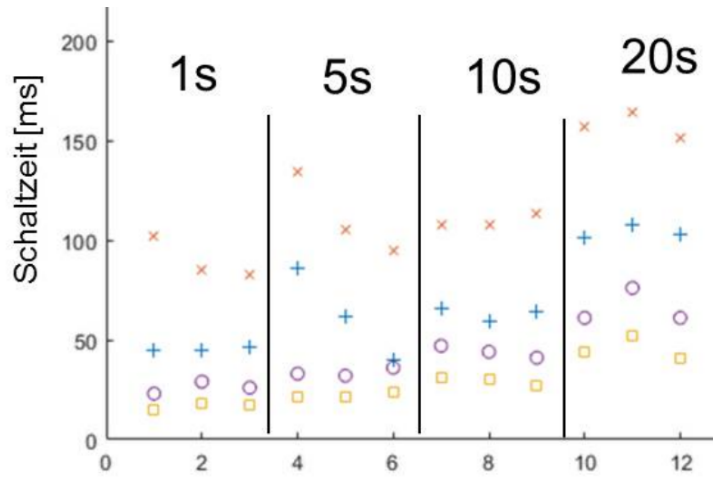
### 6.3.3 Spannung

In diesem Abschnitt soll eine konstante Spannung und eine beim Schaltvorgang veränderte Spannung an den Elektroden verglichen werden. In Kapitel 4 ging es um die Spannung, welche benötigt wird, um den ERF-Kanal zu sperren. Damit der Kanal auch sicher und möglichst schnell gesperrt wird, wurde in den bisher gezeigten Versuchen eine Spannung oberhalb der Sperrspannung verwendet. Wie in den Versuchen zum Schaltverhalten der ERF gezeigt wurde, kommt es nach dem Sperren des Kanals zu einem verzögerten Öffnen (vgl. Abb. 4.17). Damit dieser Effekt keinen Einfluss auf das Schalten eines Ventils hat, könnte man den Kanal zu keinem Zeitpunkt vollständig sperren und mit einer geringeren Druckänderung arbeiten. Dies führt jedoch zu einer längeren Schaltzeit. Beim Schließen wird in dem Fall nicht der ge-

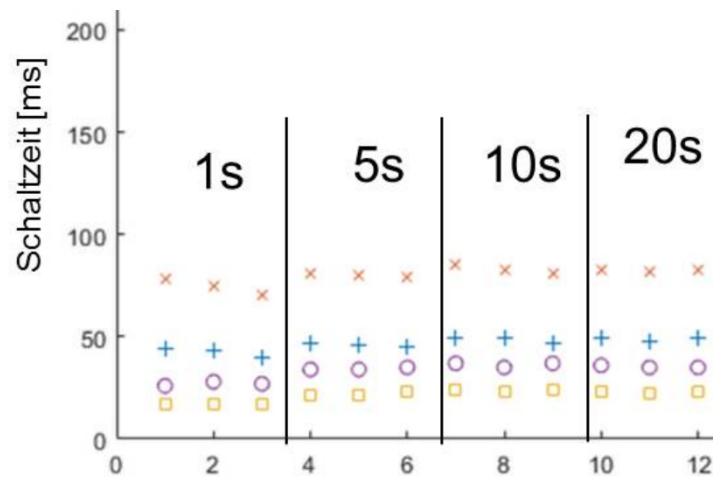
samte Volumenstrom der ERF zum Auslenken der Membran verwendet. Die Druckänderung durch den ER-Effekt ist in diesem Fall ebenfalls geringer. Wenn beim Öffnen noch etwas ERF nachfließen kann, kehrt die Membran langsamer in ihre Ausgangslage zurück.

Daher wurde eine andere Betriebsstrategie gewählt. Um ein schnelleres Öffnen des gesperrten ERF-Kanals und somit kleinere Schaltzeiten zu erreichen, wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Spannung während des Schaltvorgangs verändert wurde. Zum Schalten wird ein Wert oberhalb der Sperrspannung von 1 kV verwendet. 300 ms nach dem Schaltsignal wird die Spannung auf 0,7 kV ( $< U_{Sperr}$ ) reduziert, sodass ein kleiner Volumenstrom an ERF fließen kann. Eine ausreichend hohe Druckdifferenz über den Elektrodenbereich bleibt dabei erhalten, damit das Ventil geschlossen bleibt. Dann müssen sich die Partikel, welche den Kanal sperren, nach Wegnahme der Spannung nicht erst wieder lösen, da diese sich bereits bewegen und die Schaltzeit kann verringert werden. Auf diese Weise sind auch die Streuungen der Schaltzeiten im Vergleich zu den vorherigen Versuchen deutlich kleiner. Beides macht sich besonders bemerkbar, wenn das Ventil über einen längeren Zeitraum betätigt wird.

Die gemessenen Schaltzeiten aus Versuchen mit einem Druck von 4 bar in der ERF und 2 bar im Medium vor dem Ventil sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Das Schalten erfolgte mit zwei Elektrodenpaaren pro Ventil. Gezeigt sind die Schaltzeiten von je drei Schaltvorgängen mit einer Betätigungszeit von jeweils 1 s, 5 s, 10 s und 20 s. Im oberen Diagramm betrug die Spannung konstant 1 kV. Die gemessenen Schaltzeiten streuen stark und werden mit steigender Betätigungszeit größer. Im unteren Diagramm ist der Fall mit einer Spannungsreduktion nach dem Schaltvorgang dargestellt. Dort sind die Schwankungen der gemessenen Schaltzeiten sehr gering und es ist keine Abhängigkeit von der Betätigungszeit zu erkennen. Durch das Absenken der Spannung ist als Nebeneffekt auch die benötigte elektrische Leistung etwas geringer.



(a) Konstante Spannung.



(b) Nach dem Schaltvorgang reduzierte Spannung.

+ : 10% Schließen; x : 90% Schließen; □ : 10% Öffnen; ○ : 90% Öffnen

Abb. 6.13: Gemessene Schaltzeit bei unterschiedlichen Betätigungszeiten von 1-20s. (a) Der Versuch wurde mit einer konstanten Spannung von 1 kV durchgeführt. (b) Bei dem Versuch wurde die Spannung 300 ms nach dem Schaltsignal von 1 kV auf 0,7 kV reduziert.

## 6.4 Optimierungen und Aufbau eines Ventilstapels

### 6.4.1 Aufbau

Zur Umsetzung einer Matrix wurde ein Ansatz ausgearbeitet, bei dem die Ventile, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, gestapelt werden. Analog zu Abbildung 6.2 besteht die Matrix aus sich abwechselnden Ventil- und Verteilerebenen. Die einzelnen Ebenen haben Bohrungen, die übereinander gestapelt vertikale Kanäle ergeben, durch die das Fluid fließen kann (s. Abb. 6.14). Jede Ventilebene besteht aus einer Ventilplatte und einer Platine und enthält drei Ventile. Wie die Ventilgrundplatte der Testmatrix enthält die Ventilplatte eine Elektrode und die Ventilsitze. Zusätzlich ist dort noch ein ERF-Verteilerkanal vorhanden, durch den die ERF zu den Ventilen fließen kann. An zwei gegenüberliegenden Ecken befinden sich die Bohrungen, durch die die ERF von einer Ebene zur anderen fließen kann. Die Bohrungen zur Verbindung zwischen den Ebenen für das Medium befinden sich mittig neben den Ventilkanälen (s. Abb. 6.14a). Analog zur Testmatrix bildet auch hier eine Platine den Deckel des ERF-Ventilkanals. Die Verbindung und Dichtung zwischen Platine und Ventilplatte erfolgt durch einen Klebstoff. Auf der Unterseite der Platine sind die Schaltelektroden aufgebracht. Auf der Oberseite befindet sich die elektronische Schaltung, mit der die Hochspannung zu den einzelnen Elektroden zugeschaltet werden kann (s. Abb. 6.14b). Auf der Ventilplatte wird die Verteilerplatte montiert. Dort befinden sich in der Mitte die Kanäle, welche das Medium von den Durchgangsbohrungen zu den einzelnen Ventilsitzen transportiert. Damit die Elektronikkomponenten auf der darunter liegenden Platine Platz haben, besitzt diese zwei große Aussparungen. Die zwei kleinen Aussparungen an den Seiten dienen der Durchführung von Kabeln (s. Abb. 6.14c).

In Abbildung 6.15 ist der Aufbau des Ventilstapels in einer Explosionsansicht zu erkennen. Anhand der roten Linie kann der Verlauf des durchfließenden Mediums nachvollzogen werden. Die durchgezogene Linie zeigt den Fluss hin zum Ventil. Von dem Anschluss in der Platte unten links wird das Medium durch die Kanäle in den beiden darüberliegenden Platten auf die Anschlüsse der Verteilerplatten geleitet. Durch die senkrechten Bohrungen in Verteiler- und Ventilplatte gelangt das Medium zu der Ventilebene, in der es geschaltet werden soll. Über die Kanäle in der Verteilerplatte wird es zum Ventil geleitet und gelangt durch Bohrungen in der Ventilplatte zum Ventilsitz. Ist das Ventil offen, fließt es entlang der gestrichelten Linie wieder zurück. Dabei führt der Weg wieder durch die Kanäle in der Verteilerplatte zu den senkrechten Leitungen im Stapel. Die Kanäle in der vorletzten Platte leiten dieses zum entsprechenden Anschluss. Die ERF kommt von der Pumpe zur Platte oben rechts. Von dort fließt es durch Bohrungen, welche sich in der hinteren linken Ecke der Platten befinden, zu den einzelnen Ebenen. Durch die Bohrungen in den vorderen rechten Ecken gelangt die ERF wieder zurück.

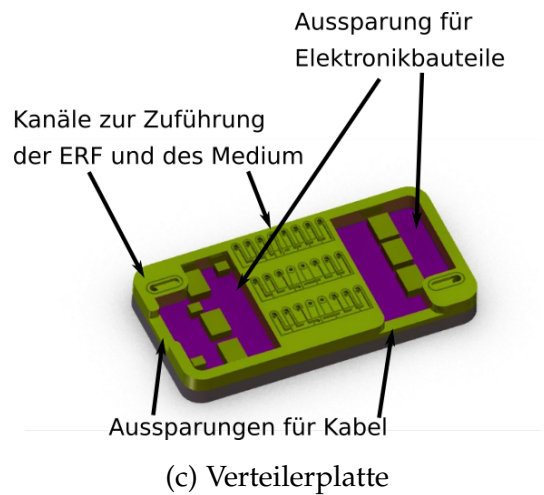
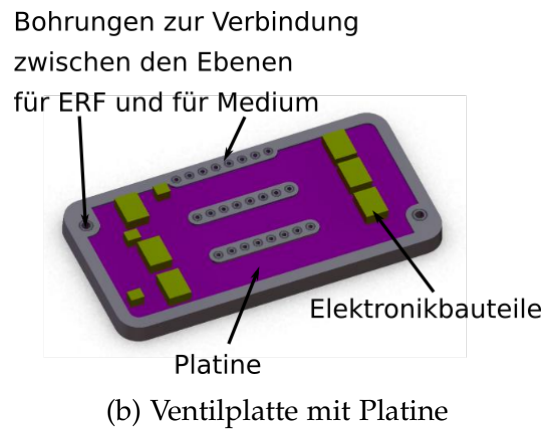
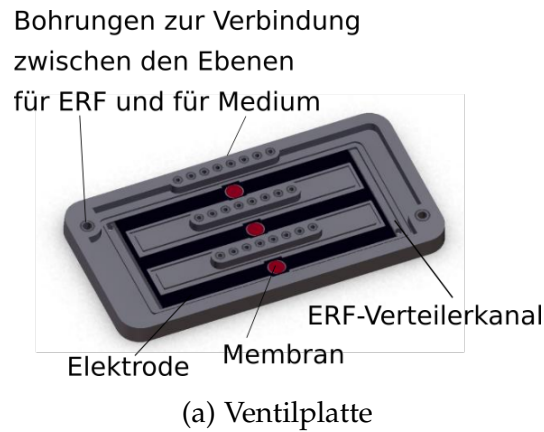


Abb. 6.14: Aufbau der Ventilstapелеbenen. (a) Ventilplatte mit eingepägter Groundelektrode und eingeklebter Membran. (b) Die Platine mit Schaltelektroden und Elektronik ist in die Ventilplatte eingeklebt. (c) Die Verteilerplatte wird auf der Ventilplatte montiert.



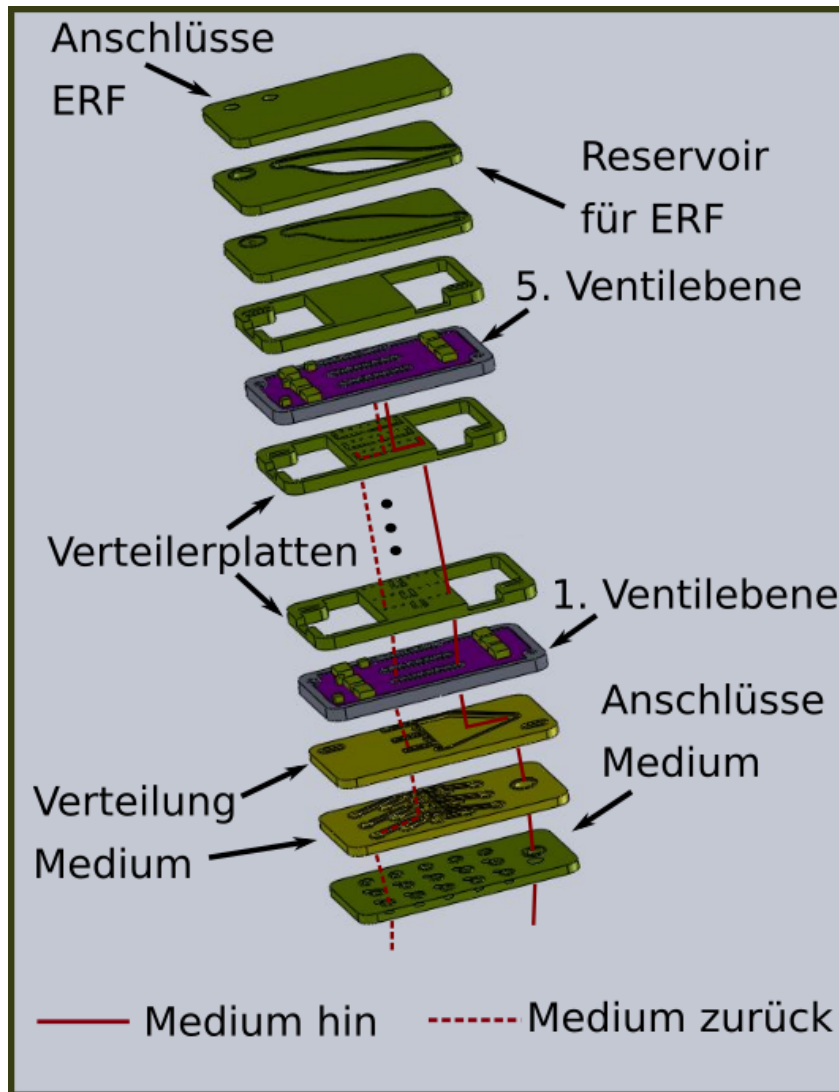


Abb. 6.15: Explosionszeichnung des Ventilstapels bestehend aus 15 Ventilen. Zur besseren Übersicht sind nur die oberste und die unterste Ventilebene dargestellt. Das Medium fließt durch die Bohrungen in der Mitte und die ERF durch die Bohrungen an den Ecken zu den einzelnen Ebenen. Die rote Linie markiert den Fließverlauf des Mediums zu einem Ventil (durchgezogene Linie) und zurück (gestrichelte Linie).

Damit die einzelnen Ventile ein gleiches Schaltverhalten aufweisen, ist es wichtig, dass der Druck in der ERF am Anfang sowie am Ende der Ventile jeweils möglichst gleich ist (vgl. Abschnitt 6.3.1). Um dies zu erreichen, wurden wie bei der Testmatrix der Querschnitt der Verteilerkanäle für die ERF deutlich größer dimensioniert als die der ERF-Schaltkanäle in den Ventilen. Zur Verifikation wurde eine FEM-Simulation der ERF-Strömung mit dem Programm *Ansys* durchgeführt. Als Randbedingung wurde der Druck am ERF-Eingang (4 bar) und -Ausgang (0 bar) vorgegeben. Ein Durchströmen aller Ventile war frei möglich, was den ungünstigsten Fall für die Druckverteilung darstellt. In Abbildung 6.16 ist als Ergebnis der Druck in der ERF dargestellt. Der Druckverlust bis zu den ERF-Ventilkanälen ist eher gering. Werden die Ventile, wie in Abschnitt 6.12 beschrieben, betrieben, ist durch den ER-Effekt ein Widerstand in den ERF-Ventilkanälen vorhanden. Dadurch ist der Druckverlust davor noch geringer, wodurch für die einzelnen Ventile quasi gleiche Schaltbedingungen vorliegen.

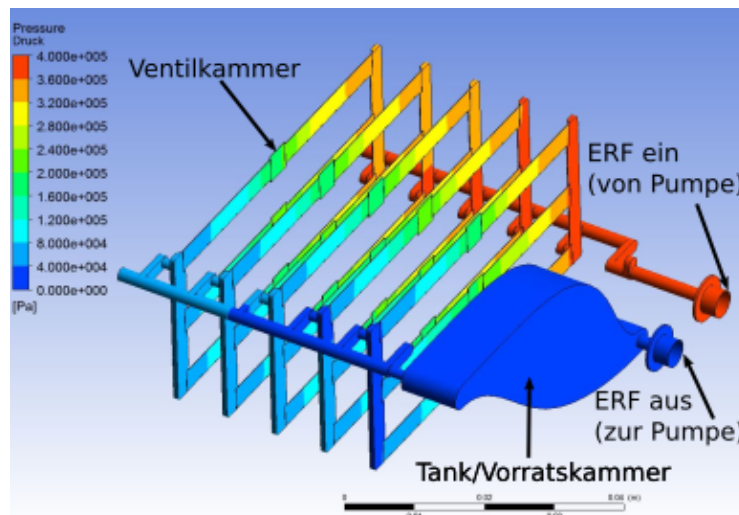


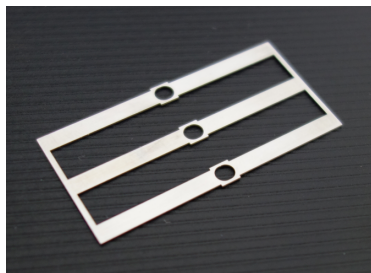
Abb. 6.16: Simulation der ERF-Strömung in dem Ventilstapel ohne angelegte Spannung. Es sind fünf Ebenen mit je drei Ventilen. Der Druckunterschied zwischen dem ersten und dem letzten Ventil ist gering. Daher sollte das Schaltverhalten der einzelnen Ventile ähnlich sein.

Die Fertigung der Ventil- und Verteilerplatten erfolgt durch Heißprägen in Polycarbonat (PC), da es sich gut durch Abformen und Ultraschallschweißen bearbeiten lässt und gute chemische Eigenschaften besitzt, wodurch es sich für viele Medien eignet. Mit einem geeigneten metallischen Formeinsatz, welcher durch Fräsen gefertigt wird, lassen sich ohne großen technischen Aufwand viele Bauteile präzise herstellen. Die Platten sollten fest miteinander verbunden und möglichst ohne weitere Elemente gedichtet werden. Um dies zu erreichen, ist das Ultraschallschweißen vorgesehen.

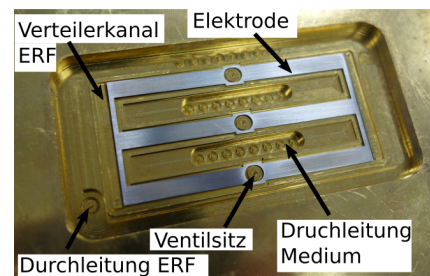
## 6.4.2 Fertigung Ventilebene

### Mechanik

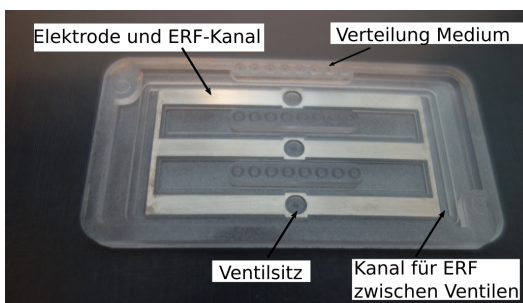
Wie bei der Herstellung der Ventilgrundplatten der Testmatrix wurde die Groundelektrode durch Heißprägen direkt in die Ventilplatte integriert. Die erodierte Elektrode aus rostfreiem Stahl ist in Abbildung 6.17a und der Formeinsatz mit eingelegter Elektrode ist in Abbildung 6.17b zu sehen. Zur Verbesserung des Entformvorgangs besitzen die senkrechten Seiten, abgesehen von den Kanalwänden, eine Entformschräge. Beim Abformvorgang liegt die Groundelektrode im Formeinsatz und wird so in die Ventilplatte eingeprägt. Abbildung 6.17c zeigt das fertig abgeformte Bauteil. Die Bohrungen im Ventilsitz (s. Abb. 6.17d) und die Durchgangsbohrungen zwischen den Platten für die ERF und das Medium werden in einem zweiten Schritt eingebracht. Zur besseren Positionierung wurden an den entsprechenden Stellen kleine Vertiefungen abgeformt.



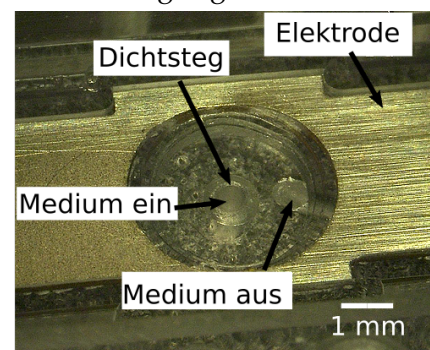
(a) Metallinsert für Groundelektrode



(b) Elektrode in den Formeinsatz eingelegt



(c) Ventilplatte

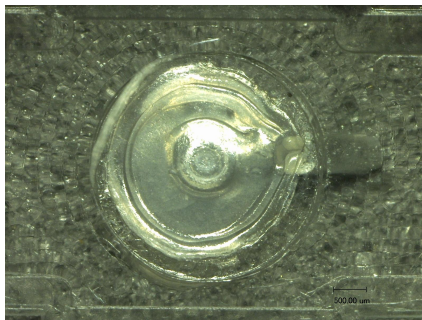


(d) Ventilsitz

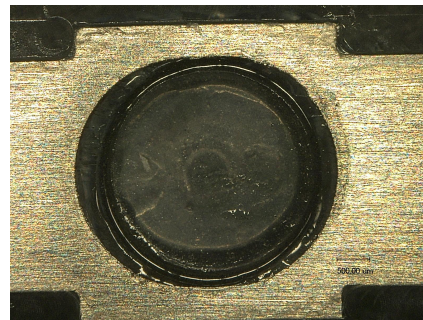
Abb. 6.17: Fertigung der Ventilplatten. Die Groundelektrode (a) wird in den Formeinsatz eingelegt (b) und beim Heißprägen mit der Ventilplatte verbunden (c). Anschließend werden die Bohrungen für das Medium in den senkrechten Verteilerkanälen und dem Ventilsitz durchgebohrt (d).

## Membran

Damit das Medium mit möglichst wenigen Materialien in Berührung kommt, sollte die Membran ebenfalls mit Ultraschallschweißen eingefügt werden. Dazu wurde als Membranmaterial ein thermoplastisches Polyurethan (TPU) gewählt. Nach dem Einschweißen saß die Membran jedoch nicht mehr straff, da sich Wellen und Falten bildeten (s. Abb. 6.18a), was für eine Ventilmembran ungeeignet ist. Daher wurde die Membran mit einem Klebstoff fixiert (s. Abb. 6.18b).



(a) Membran verschweißt



(b) Membran geklebt

Abb. 6.18: Membranbefestigung. (a) Durch den Schweißvorgang gewellte Membran. (b) Eingeklebte Membran mit glatter Oberfläche.

## Elektronik

Die Schaltelektronik, welche für jedes einzelne Ventil notwendig ist, wird auf der Platine aufgebracht, die die Schaltelektroden für die Ventile enthält. Die restliche Elektronik, die galvanische Trennung zum Netz, ein DC/DC-Hochspannungswandler und das Management der Eingangssignale werden um den Ventilstapel herum montiert. Die Schaltsignale werden wie in Abschnitt 6.2.2 durch Optokoppler getrennt. Der Hochspannungswandler transformiert die Versorgungsspannung proportional zu einem Eingangssignal in eine Hochspannung. Über einen Mikrokontroller kann diese bei einem Schaltvorgang für kurze Zeit erhöht werden, wie es aus den Versuchen in Abschnitt 6.3.3 als vorteilhaft hervorging. Der Schaltplan für die Elektronik in einer Ventilebene ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Dieser ist ähnlich zu dem in Kapitel 6.2.2. Nur sind hier jeweils zwei Elektroden an ein Eingangssignal angeschlossen. Bei wechselndem Eingangssignal wird die Hochspannung zwischen den Elektroden hin und her geschaltet. Liegt an dem Eingang V1 keine Spannung an, ist auch der Gateanschluss des Transistors T2 ohne Spannung. Somit ist die Elektrode E2 auf dem Potential der Hochspannungsquelle. Da der Transistor T1 durch die Versorgungsspannung angesteuert wird, ist die Elektrode E1 mit GND verbunden. Wird der Eingang V1 mit 5 V angesteuert, so wird der

Transistor T2 geschaltet und die Elektrode E2 wird mit GND verbunden. Ebenfalls wird der Transistor T3 angesteuert, womit der Gateanschluss von Transistor T1 mit GND verbunden wird. Damit ist dieser nicht mehr geschaltet und die Elektrode E1 nimmt das Potential der Hochspannung an. Ein Foto der so aufgebauten und getesteten Platine ist in Abbildung 6.20 zu sehen.

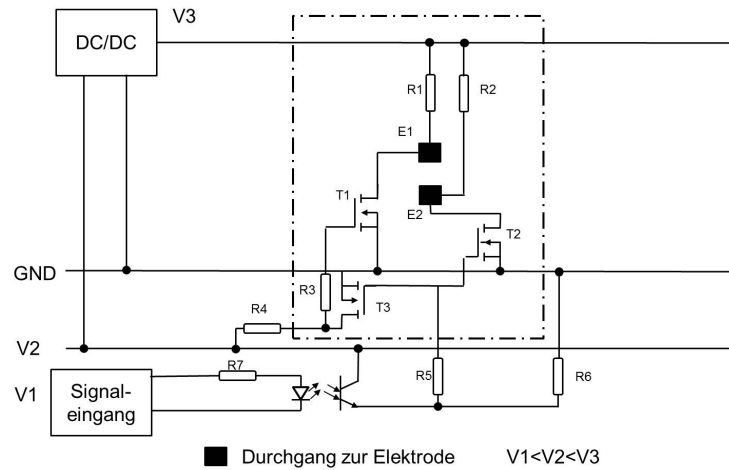
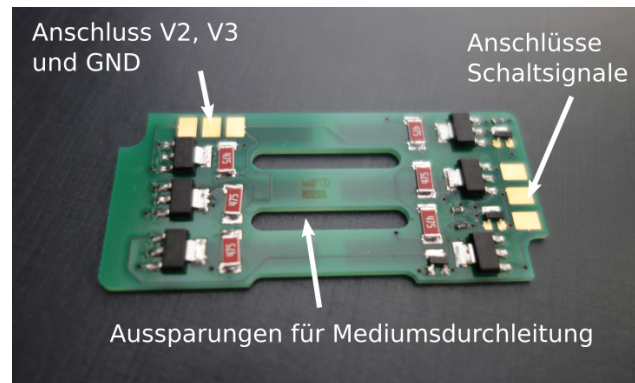
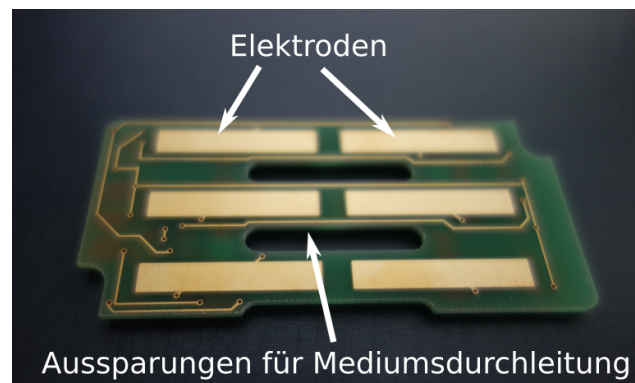


Abb. 6.19: Elektronikschaltplan für die Matrix. Der Bereich innerhalb der Strichpunkt-Linie wurde auf der Platine in der Ventilebene realisiert.





(a) Oberseite



(b) Unterseite

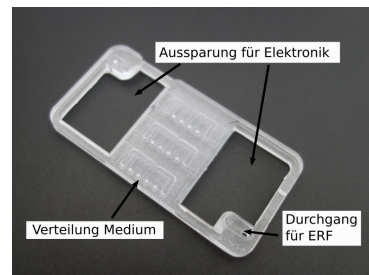
Abb. 6.20: Foto der Platine in einer Ventilebene. (a) Oberseiten mit der Schaltelektronik. (b) Unterseite mit den Schaltelektroden.

### 6.4.3 Fertigung Verteilerplatten

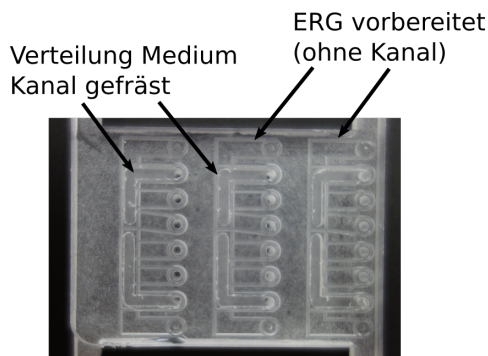
Im Gegensatz zu den Ventilplatten, die alle identisch sind, unterscheiden sich die einzelnen Verteilerplatten durch die Kanäle auf der Oberseite. Um die Anzahl der Formeinsätze gering zu halten, wurde für alle Verteilerplatten ein Formeinsatz gewählt. Dieser enthält die für das Ultraschallschweißen benötigten Energierichtungsgeber für alle Kanalvarianten. Nach dem Abformen werden in einem zweiten Schritt die Kanäle individuell durch Fräsen eingefügt und die entsprechenden Durchgangslöcher gebohrt (s. Abb. 6.21). Wie bei der Ventilplatte sind dafür kleine Vertiefungen eingebracht, durch die der Bohrer geführt wird.



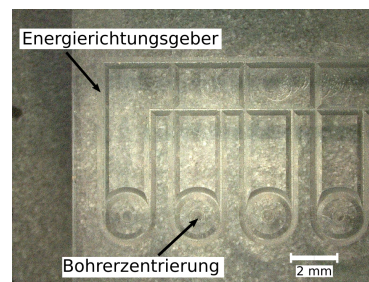
(a) Formeinsatz



(b) Verteilerplatte



(c) Verbindungskanäle der Verteilerplatte



(d) Energierichtungsgeber und Bohrzentrierungen

Abb. 6.21: Fertigung der Verteilerplatten. (a) Formeinsatz für das Heißprägen. (b) Abgeformtes Bauteil. (c) Verbindungskanäle von den senkrechten Kanälen zwischen den Ebenen zu den Ventilen. Jeweils die zweiten Verbindungskanäle sind durch einen gefrästen Kanal mit dem Ventil-sitz verbunden. (d) Vergrößerte Aufnahme der Energierichtungsgeber für das Ultraschallschweißen.

#### 6.4.4 Stapel

In Abbildung 6.22 sind die einzelnen Platten für den oben beschriebenen Ventilstapel mit 15 Ventilen abgebildet. Die Platte unten rechts hat die Gewinde zur Aufnahme der Schlauchverbinder für das Medium. Die beiden Platten links daneben leiten das Medium zwischen den Eingängen und Ausgängen zu den senkrechten Bohrungen durch den Stapel. Mit diesen Platten lässt sich ein Medium auf 15 Ausgänge verteilen. Es folgen die oben beschriebenen Ventilplatten mit der Elektronik und die Verteilerplatten. Die Schlauchanschlüsse für die ERF werden in die letzte Platte links oben geschraubt. Die beiden Platten rechts daneben bilden ein Reservoir für die ERF. Zusammengefügt hat der gesamte Ventilstapel eine Baugröße von 74 mm x 59 mm x 37 mm.



Abb. 6.22: Übersicht über die 16 Platten des Ventilstapels. Diese werden von links oben zeilenweise nach rechts unten aufeinander geschweißt.



Die Verbindung der Ventil- und Verteilerplatten zu einem Stapel erfolgt durch Ultraschallschweißen. Die Energierichtungsgeber für das Ultraschallschweißen haben einen dreieckigen Querschnitt. So wird die Energie beim Ultraschallschweißen auf eine kleine Fläche eingetragen, was zu einer schnelleren Erwärmung führt. Nach der Fertigung der Ventil- und Verteilerplatten wurde auch deren Verschweißung zu einem Stapel getestet. Beim Verschweißen des gesamten Stapels in einem Schritt kommt in den unteren Lagen nicht ausreichend Energie an. Somit werden diese gar nicht oder nur unzureichend verschweißt. Daher müssen die einzelnen Platten nacheinander aufeinander geschweißt werden. Ein testweise verschweißter Stapel aus Ventil-, Verteilerplatten, Reservoir und ERF-Anschluss ist in Abbildung 6.23 zu sehen.

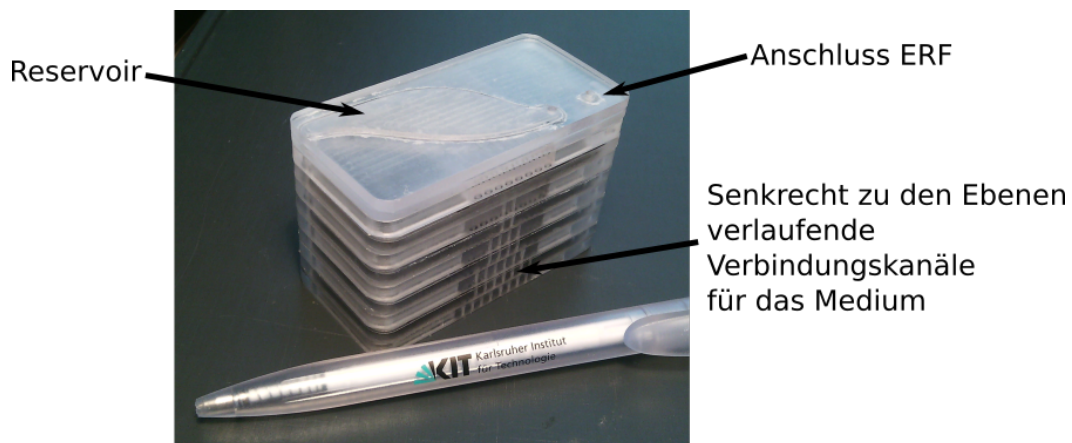


Abb. 6.23: Verschweißter Ventilstapel mit den Ventil-, Verteilerebenen und Reservoir. An der Seite sind die senkrecht zu den Ebenen verlaufenden Verbindungsbohrungen für das Medium gut zu erkennen.

## 6.5 Fazit

Wie in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels beschrieben, wurde eine Testmatrix mit drei Ventilen aufgebaut und getestet. Die einzelnen Ventile bestehen aus drei Teilen: Der Ventilgrundplatte, einer Platine und der Membran. Diese wurden durch Kleben zusammengefügt. Die Ventilgrundplatte ist das Herzstück und beinhaltet den Kanal für die ERF, den Ventilsitz und die Groundelektrode. Sie wird durch Abformen hergestellt, wobei die Groundelektrode direkt eingeprägt wird. Die Platine stellt den Deckel für den ERF-Kanal dar und beinhaltet die zweiten Elektroden zum Schalten. Eine elektronische Schaltung zur Ansteuerung der Ventile durch ein Normsignal wurde ebenfalls entwickelt und getestet. Diese kann in weiteren Ventilaufbauten direkt auf der Platine untergebracht werden.

Die Ventile können mit einer Signalspannung von 5 V einzeln und ohne eine gegenseitige Beeinflussung geschaltet werden. Die Schaltzeit beim Schließen des Ventils hängt stark von der Druckdifferenz zwischen der ERF und dem geschalteten Medium ab. Beim Öffnen spielt dieser jedoch kaum eine Rolle. Hier kann die Schaltzeit gering gehalten werden, wenn auch die Elektrode vor der Ventilkammer verwendet und so ein Nachströmen der ERF verhindert wird. Indem die Spannung nach dem Schaltvorgang reduziert wird, ist der Kanal durch die ERF nur eine kurze Zeit komplett gesperrt und die Partikel bleiben in Bewegung. So reagieren die Ventile auch nach längerer Betätigungszeit schnell und ohne große Schwankungen in der Reaktionszeit.

Mit dem entwickelten Ventilstapel lassen sich viele Ventile kompakt anordnen und durch verschiedene Anschlussplatten unterschiedliche Verschaltungen erreichen. Durch Abformung lassen sich die Ventil- und Verteilerplatten gut in größerer Stückzahl herstellen. Für Medien, bei denen das Einkleben der Membran ein Problem darstellt, können für das Einschweißen der Membran konstruktive Änderungen vorgenommen werden, damit die Membran beim Ultraschallschweißen weniger schwingt und keine Falten bekommt. Alternativ kann diese bei geeigneter Materialwahl, auch mit Laserdurchstrahlschweißen befestigt werden. Dies hat den Vorteil, dass erst gar keine Schwingungen erzeugt werden. Für sehr große Stückzahlen, kann der Heißprägeprozess durch Spritzgießen erfolgen und die Elektrode ausgestanzt werden. Auf diese Weise lässt sich der oben gezeigte Ventilstapel schnell und in größeren Stückzahlen herstellen und für eine praktische Anwendung umsetzen.

# 7 Diskussion der Ergebnisse

## 7.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob sich ein Antriebskonzept auf der Basis einer elektrorheologischen Flüssigkeit zur Ansteuerung einer Ventilmatrix eignet und welche Vor- und Nachteile dieses hat. Die entwickelte Matrix lässt sich in zwei Teile aufsplitten, eine zentrale Versorgungseinheit und die einzelnen Ventile (s. Abb. 7.1). In der Versorgungseinheit wird die Energie für das Schalten der Ventile bereitgestellt und deren Ansteuerung geregelt. Diese beinhaltet die Stromversorgung, welche einmal als Niederspannung und nach einer DC/DC-Wandlung als Hochspannung an die einzelnen Ventile weitergeleitet wird. Die Eingänge der Schaltsignale werden dort galvanisch getrennt und ebenfalls an die einzelnen Ventile weitergeleitet. Eine Pumpe fördert die ERF zu den einzelnen Ventilen und ein Druckregler sorgt für einen konstanten Druck. Durch die separate Energieversorgung für alle Ventile sind die einzelnen Ventile einfach aufgebaut.

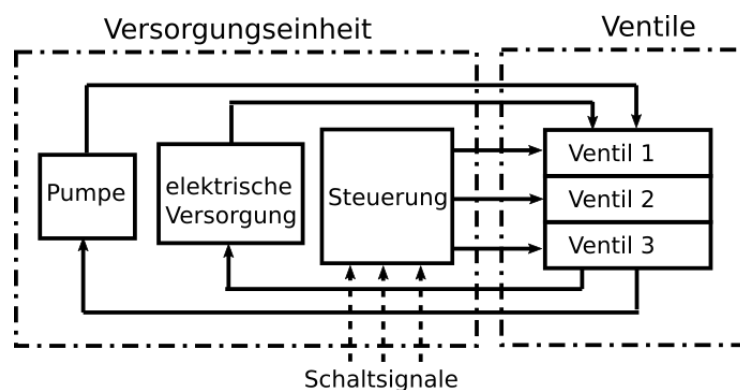


Abb. 7.1: Die Versorgungseinheit enthält die Pumpe, welche die ERF zu den Ventilen pumpt und somit die Energie zum Betätigen der Ventile bereitstellt. Dort ist auch ein großer Teil der Elektronik untergebracht. Die Ventile können somit einfacher aufgebaut werden und lassen sich gut in einer Matrix anordnen.

Jedes einzelne Ventil enthält einen Kanal für die ERF mit zwei integrierten Elektroden, eine Membran, einen Ventilsitz und Elektronikbauteile (s. Abb. 7.2). Je nachdem, ob ein elektrisches Schaltsignal an dem Ventil anliegt oder nicht, ist eine der beiden Schaltelektroden des Ventils mit der Hochspannung verbunden. Durch den ER-Effekt wird dort der Kanal gesperrt. Erfolgt die Sperrung hinter der Membran, liegt der Druck an der Membran nahe dem am Anfang des ERF-Kreislaufs eingestellten Drucks. Dies führt dazu, dass die Membran auf den Ventilsitz gedrückt wird und den Weg für das gesteuerte Medium versperrt. Wird die Spannung auf die Schaltelektrode vor der Membran geschaltet, fällt der Druck auf den Wert am Ende des ERF-Kreislaufs ab und die Membran gibt den Weg für das geschaltete Medium wieder frei. Die Groundelektrode wird während des Betriebs permanent auf 0 V gehalten und nur die Spannung an den darüberliegenden Schaltelektroden geändert. Daher ist eine gemeinsame Groundelektrode für beide Elektrodenpaare ausreichend, wodurch die Fertigung vereinfacht wird.

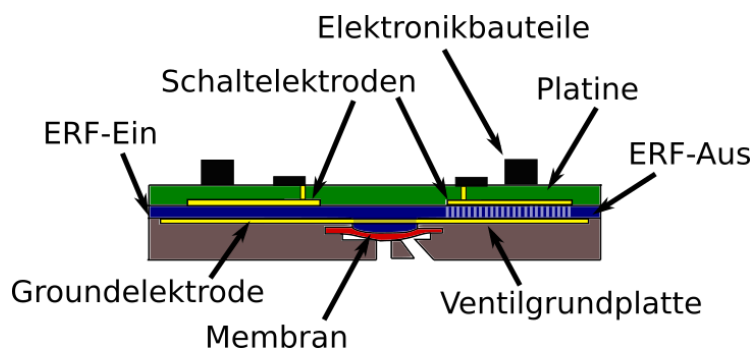


Abb. 7.2: Aufbau eines einzelnen Ventils in der Matrix.

Die äußeren Abmaße eines einzelnen Ventils werden im Wesentlichen durch den Kanal bestimmt. Wie sich aus den Vorversuchen ergab, sollte dieser flach sein, damit die beiden Elektroden eines Elektrodenpaares nahe beieinander liegen und somit die benötigten elektrischen Spannungen gering sind. Durch ein Stapeln der Ventile können diese kompakte angeordnet werden. In der in dieser Arbeit entworfenen Matrix werden je drei Ventile in einer Ebene zusammengefasst von denen fünf übereinander montiert werden. Senkrecht zu den Ebenen verlaufen Kanäle, durch die das geschaltete Medium und die ERF zu den einzelnen Ebenen fließen können. Zwischen den Ventilebenen befinden sich Verteilerplatten, welche die einzelnen Ventile mit den senkrecht zu den Ebenen verlaufenden Kanälen verbinden. Über die senkrechten Kanäle in den Ventilebenen und den Verteilerplatten ist somit jeder Ventilzugang und Ventilausgang mit der Stapelunterseite verbunden. Dort sind Anschlussplatten angebracht, an die die Anschlüsse für das Medium montiert werden. So können bei einem standardisierten Ventilblock durch verschiedene Anschlussplatten unterschiedliche Matrixfunktionen realisiert werden (s. Abb. 6.2).

Anhand einer Matrix mit einer Ventilebene mit drei Ventilen wurde das Schaltverhalten getestet. Ein getrenntes Aufbauen der einzelnen Komponenten, wie Elektronik und Pumpe, ermöglichte es, diese separat zu testen und individuell zu verändern. Mit einem elektrischen Schaltsignal konnten die Ventile individuell angesteuert und Druckluft geschaltet werden. Während des Schaltvorgangs erfolgte durch eine ausreichend hohe Spannung ein Sperren des Kanals an der entsprechenden Elektrode. Kurz nach dem Schalten wurde die Spannung an den Elektroden soweit reduziert, dass sich ein kleiner Durchfluss an ERF einstellte. Dadurch befinden sich die Partikel bereits vor dem nächsten Schaltvorgang in Bewegung, wodurch das Ventil schnell und zuverlässig schaltet.

Ein Ventilstapel wurde nach dem oben beschriebenen Aufbau entwickelt. Durch die Anschlussplatten wird darin ein Medium auf 15 Ausgänge verteilt. Die Fertigungsverfahren orientierten sich dabei an einer guten Integrierbarkeit in einer Ventilmatrix und einer Herstellung in größeren Stückzahlen. Die Ventilgrundplatten mit dem ERF-Kanal wurden mittels Heißprägen hergestellt. In diesem Arbeitsschritt erfolgte auch das Einbringen der Groundelektrode an der Kanalunterseite. Diese erhält durch Erodieren ihre Form und wird in den Formeinsatz gelegt. Beim Prägevorgang verbindet sich diese mit der Ventilgrundplatte. Werden sehr hohe Stückzahlen benötigt, kann die Groundelektrode ausgestanzt werden und das Formen der Ventilgrundplatte, inklusive dem Eingießen der Groudelektrode, durch Spritzgießen erfolgen. Die obere Kanalwand besteht aus einer Platine, auf der sich die Schaltelektroden befinden. Auf der anderen Seite der Platine werden diese kontaktiert und die Elektronik montiert, welche die Hochspannung zwischen den Schaltelektroden hin und her schaltet. So kann durch die Integration der verschiedenen Funktionen in der Platine die Anzahl der Bauteile und der Montageaufwand reduziert werden.

Die Verteilerplatten werden ebenfalls durch Heißprägen hergestellt. Da die Verteilerplatten der verschiedenen Ebenen sich nur wenig unterscheiden, wurde ein Formeinsatz für alle Platten verwendet, welche anschließend durch Fräsen angepasst wurden. Für die Herstellung mehrerer identischer Ventilstapel kann dieser Schritt gespart werden, indem individuelle Formeinsätze für jede Ebene gefertigt werden. Zur Verbindung der einzelnen Ebenen wurde das Ultraschallschweißen gewählt. Dazu werden die Bauteile in einer entsprechenden Halterung fixiert und durch das Einkoppeln des Ultraschalls in weniger als einer Sekunde dauerhaft verbunden. Die stoffschlüssige Verbindung dichtet zudem die Verbindungsstellen ab. Somit sind keine zusätzlichen Bauteile zur Dichtung notwendig und das Medium kommt mit keinen weiteren Materialien in Kontakt, die von dem Medium angegriffen werden oder das Medium kontaminieren.

Mit den entwickelten Ventilen konnte gezeigt werden, dass sich eine elektrorheologische Antriebseinheit durchaus zum Ansteuern einer Ventilmatrix eignet. Durch Stapeln der Ventile lassen sich diese kompakt anordnen und verschiedene Schaltfunktionen realisieren. Die erreichten Schaltzeiten von unter 50 ms sind für die meisten Anwendungen ausreichend und eine Beeinflussung der Ventile untereinander wurde in den Versuchen nicht festgestellt. Zur Aufrechterhaltung eines konstanten Drucks förderte die Pumpe einen Volumenstrom durch den Druckregler. Diese Verlustleistung bestimmte maßgeblich die Gesamtleistung, da die benötigte elektrische Energie im Vergleich dazu wesentlich geringer war. Die hydraulische Verlustleistung bleibt jedoch bei mehreren Ventilen konstant und verteilt sich bei einer großen Ventilmatrix auf die einzelnen Ventile. Durch eine Pumpe, welche einen geringeren Volumenstrom fördern kann, lassen sich diese verringern. Eine Erwärmung des Fluids innerhalb der Matrix wurde nicht gemessen, wodurch sich das Aktorkonzept auch für temperaturempfindliche Medien eignet.

## 7.2 Ausblick

Zum Betrieb der Ventilmatrix sind weitere Komponenten notwendig. In Abbildung 7.3 ist ein CAD-Modell einer kompletten Matrix zu sehen. Die zentrale Baugruppe ist der oben beschriebene Ventilstapel mit 15 Ventilen. Alle anderen elektronischen Komponenten, welche von allen Ventilen gemeinsam genutzt werden, sind um den Ventilstapel platziert und von einem Gehäuse umschlossen. Am vorderen Ende des Ventilstapels befinden sich die Anschlüsse für das Medium. Die ERF wird an der Rückseite angeschlossen. Die Pumpe ist auf dem Gehäuse montiert und wird über Schläuche mit dem Ventilstapel verbunden. Ein auf der Rückseite liegender Druckregler, welcher dazwischen geschaltet ist, regelt den Druck der ERF. Elektrisch wird die Matrix an der vorderen rechten Seite angeschlossen. Dort sind eine galvanische Trennung zur Stromversorgung und die Platine für die Pumpensteuerung untergebracht. Der Hochspannungswandler wird oben auf dem Ventilstapel montiert. Dort wird er über ein Kabel direkt mit den einzelnen Ventilebenen verbunden. Dadurch wird die Hochspannung an keinen weiteren Elementen vorbeigeführt. Die Eingänge der Schaltsignale liegen an der hinteren linken Seite. Dort sind Optokoppler für die galvanische Trennung vorgesehen und der Mikrocontroller zur dynamischen Spannungsregelung. Der Aufbau lässt sich leicht um weitere Ventile erweitern. Dazu können weitere Ebenen hinzugefügt oder mehrere Ventile in einer Ebene untergebracht werden. Dies hat nur eine geringe Änderung der Gesamtgröße der Ventilmatrix zur Folge.

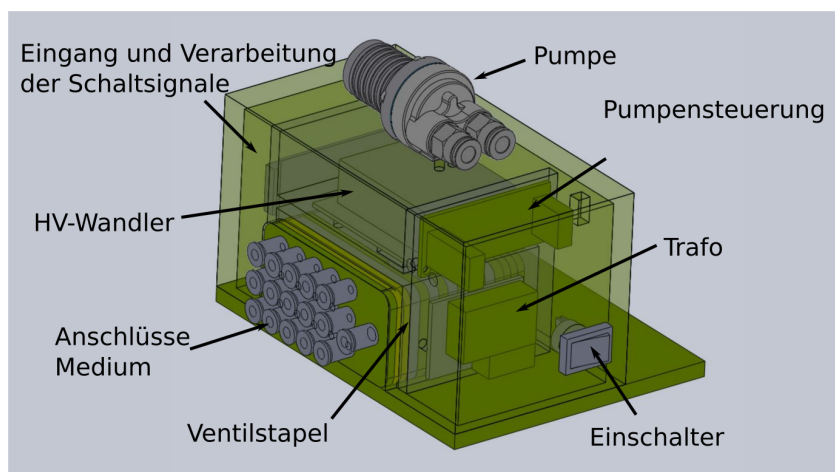


Abb. 7.3: CAD-Modell des Konzepts für eine Ventilmatrix.





# Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen / Abkürzung	Einheit (SI)	Beschreibung
$d_H$	$m$	Hydraulischer Durchmesser: $d_H = \frac{A}{U}$
$E$	$Pa = \frac{N}{m^2}$	E-Modul
$E_{DS}$	$Pa = \frac{V}{m}$	Durchschlagsspannung
ER	–	Elektorrheologisch
ERF	–	Elektorrheologische Flüssigkeit
ERG	–	Energierichtungsgeber
$F$	$N = \frac{kgm}{s^2}$	Kraft
HV	–	Hochspannung (High Voltage)
PC	–	Polycarbonat
PMMA	–	Polymethylmethacrylat
PVD	–	Physical Vapour Deposition
$Re$	–	Reynoldszahl
$T$	$K$	Temperatur
$t$	$s$	Zeit
$U$	$m$	Umfang
USS	–	Ultraschallschweißen
$v$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$p$	$Pa = \frac{N}{m^2}$	Druck: $p = \frac{F}{A}$
$Q$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom: $p = \frac{V}{t}$
$R$	$\frac{kg}{sm^4}$	Hydraulischer Widerstand
$\epsilon_r$	–	Dielektrizitätskonstante
$\eta$	$Pa\ s = \frac{kg}{sm}$	Dynamische Viskosität
$\dot{\gamma}$	$frac^\circ s$	Schergeschwindigkeit
$\nu$		Querkontraktionszahl
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte: $\rho = \frac{m}{V}$
$\tau$	$Pa = \frac{N}{m^2}$	Schubspannung
$\tau_F$	$Pa = \frac{N}{m^2}$	Fließgrenze



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipskizze der Ventilidee . . . . .	4
2.1	Zweiplattenmodell . . . . .	5
2.2	Fließverhalten verschiedener Fluide . . . . .	7
2.3	Rechteckkanal . . . . .	8
2.4	Schematische Darstellung des ER-Effekts . . . . .	10
2.5	Auswirkung des E-Felds auf die Fließgrenze einer ERF. . . . .	11
2.6	Aufnahme der Kettenbildung durch die Partikel einer ERF im E-Feld [19] . . .	11
2.7	TEM-Aufnahme der Partikel einer ERF [23] . . . . .	12
2.8	Simulation des ER-Effekt auf Molekülebene [29] . . . . .	13
2.9	Verlauf des E-Felds und des elektrischen Potentials bei Schichten unterschiedlicher Materialien. . . . .	15
2.10	Messwerte und geschätzte Gerade. . . . .	16
2.11	Schematische Übersicht der wesentlichen Fertigungsschritte . . . . .	17
2.12	Temperatur-Kraftverlauf beim Heißprägen . . . . .	18
2.13	Ablauf Heißprägen . . . . .	19
2.14	Prinzip Sputtern [37] . . . . .	20
2.15	Schematische Darstellung des Kammer- und Kapillarkleben . . . . .	22
2.16	Schematische Darstellung des Ultraschallschweißvorgangs . . . . .	24
2.17	Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine [44] . . . . .	25
3.1	Schematische Darstellung eines Sitz- und eines Drehschieberventils . . . . .	28
3.2	Prinzip einer möglichen Ausführungsform eines elektromagnetischen Ventilantriebs . . . . .	29
3.3	Skizze eines piezoelektrisch angetriebenen Sitzventils . . . . .	30
3.4	Einweg-Formgedächtniseffekt [52] und Skizze eines FGL-Aktors . . . . .	31
3.5	Skizze eines Sitzventils mit FGL-Aktor . . . . .	31
3.6	Prinzip elektrostatischer Aktor . . . . .	32
3.7	Schematische Darstellung eines Ventils mit elektrostatischem Aktor. [54] . . . .	33
3.8	Pneumatisch angetriebenes Ventil [60] . . . . .	34
3.9	Pneumatisch angetriebene Ventilmatrixschaltung nach Binärsystem [57] . . . .	34
3.10	Ventilaktoren auf Basis von Phasenübergängen. [62] . . . . .	35

---

3.11	Elektrorheologische Zylinderansteuerung [63] . . . . .	37
3.12	Zwei Beispiele der Ansteuerungen eines Braille-Displays durch elektrorheologische Flüssigkeiten. [64,65] . . . . .	38
3.13	Mikroventil mit elektrorheologischer Ansteuerung [66] . . . . .	39
4.1	Schematische Darstellung des Rechteckkanals mit Elektroden. . . . .	42
4.2	CAD-Modell des Testchips zur ERF-Charakterisierung . . . . .	44
4.3	Kombination von Kapillar- und Kammerkleben . . . . .	44
4.4	Foto des Testchips zur ERF-Charakterisierung . . . . .	45
4.5	Teilweise abgelöste Elektrode. . . . .	45
4.6	CAD-Modell des geänderten Testchips zum Aufsputtern der Elektrode. . . . .	46
4.7	Hydraulikschaltplan des Versuchsstands . . . . .	48
4.8	Darstellung der Kommunikation zwischen PC und den Komponenten des Versuchsstands. . . . .	48
4.9	Foto des Versuchsstands . . . . .	49
4.10	Schematische Darstellung der Teststrecke im Testchip . . . . .	50
4.11	Versuchsablauf zur Ermittlung der Sperrspannung . . . . .	51
4.12	Sperrspannung bei unterschiedlichen Elektrodenabständen . . . . .	52
4.13	Sperrspannung ( $U_{Sperr}$ ) bei unterschiedlichen Elektrodenlängen . . . . .	53
4.14	Einfluss des Elektrodenabstands und der Elektrodenlänge auf die Sperrspannung	54
4.15	Temperatureinfluss . . . . .	56
4.16	Druckverlauf vor und hinter dem Testkanal beim Zuschalten einer Spannung an den Elektroden. . . . .	57
4.17	Versuche zum Hystereseverhalten der ERF mit Kanalsperrung . . . . .	58
4.18	Versuch zum Hystereseverhalten der ERF ohne Kanalsperrung. . . . .	59
4.19	Aufnahmen der ERF . . . . .	60
5.1	Prinzipskizze des Ventilkonzepts . . . . .	63
5.2	Einzelventil Schnittansicht . . . . .	64
5.3	Schnittansicht des Ventilsitz . . . . .	65
5.4	ERF-Ventil auf dem Versuchsstand montiert . . . . .	65
5.5	Ausschnitt aus dem Fluidschaltplan für die Versuche mit dem Einzelventil . . . . .	66
5.6	Druck- und Spannungsverlauf beim Schließen des Einzelventils . . . . .	67
5.7	Schematische Darstellung der auf die Membran wirkenden Kräfte . . . . .	68
5.8	Öffnungsverhalten des Einzelventils bei unterschiedlichen Betriebsmodi. . . . .	69
5.9	Schließ- und Öffnungsverhalten des Ventils bei vorgeschaltetem Magnetventil. . . . .	70
5.10	FEM-Simulation der Membranverformung . . . . .	72
5.11	Prinzipskizze des Ventilkonzepts mit zwei Elektroden . . . . .	73
6.1	Mögliche Anordnungen der Ventile in einer Matrix . . . . .	76

6.2	Prinzipskizze der einzelnen Ebenen eines Ventilstapels . . . . .	76
6.3	Hydraulikprinzipskizze der Testmatrix . . . . .	78
6.4	Schnitt durch ein Ventil in der Testmatrix . . . . .	79
6.5	CAD-Modell eines einzelnen Ventils . . . . .	80
6.6	Teilschnitt durch die Testmatrix . . . . .	81
6.7	Montageschritte beim Aufbau der Testmatrix. . . . .	83
6.8	Foto der Ventilmatrix auf dem Prüfstand. . . . .	84
6.9	Schaltplan der verwendeten Elektronik . . . . .	85
6.10	Druckverläufe beim Schalten eines einzelnen Ventils der Ventilmatrix . . . . .	86
6.11	Einfluss der Druckdifferenz zwischen ERF und Medium auf die Schaltzeit . . . . .	87
6.12	Einfluss der Elektrodenansteuerung auf die Schaltzeit . . . . .	88
6.13	Gemessene Schaltzeit bei unterschiedlichen Steuerungsvarianten . . . . .	90
6.14	Aufbau der Ventilstapelebenen . . . . .	92
6.15	Explosionszeichnung des Ventilstapels . . . . .	93
6.16	Simulation der ERF-Strömung in dem Ventilstapel . . . . .	94
6.17	Fertigung der Ventilplatten . . . . .	95
6.18	Membranbefestigung . . . . .	96
6.19	Elektronikschaltplan für die Matrix . . . . .	97
6.20	Foto der Platine in einer Ventilebene . . . . .	98
6.21	Fertigung der Verteilerplatten . . . . .	99
6.22	Übersicht über die 16 Platten des Ventilstapels . . . . .	100
6.23	Verschweißter Ventilstapel . . . . .	101
7.1	Schema der Gesamtmatrix . . . . .	103
7.2	Aufbau eines einzelnen Ventils in der Matrix . . . . .	104
7.3	CAD-Modell des Konzepts für eine Ventilmatrix . . . . .	107



# Literaturverzeichnis

- [1] Holger Watter. *Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation*. 2017. Wiesbaden; Springer Vieweg; 5. überarbeitete und erweiterte Auflage; ISBN: 978-3-658-18554-1.
- [2] Marcus Geimer and Philipp Nagel. *Vorlesungsskript Fluidtechnik*. 2013. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik.
- [3] Kwang W. Oh and Chong H. Ahn. A review of microvalves. 2006. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, p. R13-R39; DOI: 10.1088/0960-1317/16/5/R01.
- [4] Andreas E. Guber. *BioMEMS I Vorlesungsskript*. 2015. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikrostrukturtechnik.
- [5] Proyak Datta. *Modular, Polymeric Development Platform for Microfluidic Applications Design, Fabrication, Testing and Examples*. 2007. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe.
- [6] aprentas (Hrsg.). *Laborpraxis Band 3: Trennungsmethoden*. 2017. Cham; Springer; 6. Auflage; ISBN: 978-3-0348-0970-2.
- [7] Sebastian Franz Krabbe. *System für die gleichzeitige Messung des Stoffwechsels von Zellkulturen in bis zu 48 Wells in Mikrotiterplatten*. 2018. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [8] Ping Sheng and Weijia Wen. *Electrorheological Fluids: Mechanisms, Dynamics, and Microfluidics Applications*. 2012. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, p. 143-174; DOI: 10.1146/annurev-fluid-120710-101024.
- [9] Jong-Seok Oh and Seung-Bok Choi. State of the art of medical devices featuring smart electro-rheological and magneto-rheological fluids. 2017. *Journal of King Saud University - Science*, vol. 29, p. 390-400; DOI: 10.1016/j.jksus.2017.05.012.
- [10] Sang-Rock Lee, Chang-Ho Uhm, Min-Sang Seong, Jong-Seok Oh, and Seung-Bok Choi. Repulsive force control of minimally invasive surgery robot associated with three degrees of freedom electrorheological fluid-based haptic master. 2014. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 228, p. 1606-1621; DOI: 10.1177/0954406213508935.
- [11] S. S. Han and S. B. Choi. Position control of a dual-servo stage featuring an electrorheological fluid clutch and piezostack actuator. 2004. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 218, p. 1435-1448; DOI: 10.1243/0954406042690470.
- [12] Dorothea Adams (Fludicon GmbH), Lucien Johnston (Fludicon GmbH), Horst Scherk (Fludicon GmbH), and Dr Horst Rosenfeldt (Fludicon GmbH). Transport system for sensitive goods based on electrorheological fluids. Per E-Mail zugeschickt von Lucien Johnston.
- [13] Michael Kamelreiter, Wolfgang Kemmetmüller, and Andreas Kugi. Digitally controlled electrorheological valves and their application in vehicle dampers. 2012. Mechatronics, Band 22, p. 629-638; DOI: 10.1016/j.mechatronics.2012.02.002.
- [14] Bernhard Hochstein. Vorlesung Rheometrie und Rheologie WS13/14. 2013. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik.
- [15] Quentin Guegan, J.-N. Foulc, F. Ayela, and O. Tillement. Electrical controlled rheology of a suspension of weakly conducting particles in dielectric liquid. 2006. arXiv, physics/0607158.
- [16] Jürgen Zierep and Karl Bühler. Grundzüge der Strömungslehre: Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide. 2010. Vieweg + Teubner; 8. überarb. und erw. Auflage; Wiesbaden; ISBN: 978-3-8348-0834-9.
- [17] Henrik Bruus. Theoretical Microfluidics. 2008. Oxford University Press Inc., New York; ISBN: 978-0-19-923509-4.
- [18] Bernd Pietschmann. Elektrorheologische Flüssigkeiten auf Basis von mit ionischen Flüssigkeiten modifizierten Silica- Materialien. 2011. Dissertation an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- [19] Weijia Wen, Xianxiang Huang, and Ping Sheng. Electrorheological fluids: structures and mechanisms. 2008. Soft Matter, vol. 4, p.200-210; DOI: 10.1039/B710948M.
- [20] Martin Stenicka, Vladimir Pavlinek, Petr Ponizil, Takeshi Kitano, and Petr Saha. A note on secondary electrorheological patterns. 2012. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 23, p. 1061-1066; DOI: 10.1177/1045389X12443595.
- [21] Hartmut Janocha. Unkonventionelle Aktoren: Eine Einführung. 2013. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München; ISBN: 978-3-486-71886-7.



- [22] Tian Hao. Electrorheological suspensions. 2002. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 97, Ausg. 1-3, p. 1-35; DOI: 10.1016/S0001-8686(01)00045-8.
- [23] Jiayang Hou, Lei Shi, and Qingren Zhu. Electrorheological properties and structure of  $(\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2/\text{NH}_2\text{CONH}_2)$ . 2006. *Journal of Solid State Chemistry*, Band 179, p. 1874-1878; DOI: 10.1016/j.jssc.2006.02.026.
- [24] M Gurka, D Adams, L Johnston, and R Petricevic. New electrorheological fluids — characteristics and implementation in industrial and mobile applications. 2009. *Journal of Physics: Conference Series*, Band 149; DOI: 10.1088/1742-6596/149/1/012008.
- [25] Ying Dan Liu and Hyoung Jin Choi. Electrorheological fluids: smart soft matter and characteristics. 2012. *Soft Matter*, Band 8, Ausgabe 48; DOI: 10.1039/c2sm26179k.
- [26] Steffen Schneider. Methoden zur Charakterisierung elektrorheologischer Suspensionen unter besonderer Berücksichtigung des Temperatureinflusses. 2007. Dissertation an der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [27] C. W. Wu and H Conrad. A modified conduction model for the electrorheological effect. 1996. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 29, p. 3147-3153, DOI: 10.1088/0022-3727/29/12/032.
- [28] C. W. Wu and H. Conrad. Dielectric and conduction effects in non-Ohmic electrorheological fluids. 1997. *Physical Review E*, vol. 56, p. 5789-5797, DOI: 10.1103/PhysRevE.56.5789.
- [29] Shuyu Chen, Xianxiang Huang, Nico F. A. van der Vegt, Weijia Wen, and Ping Sheng. Giant Electrorheological Effect: A Microscopic Mechanism. 2010. *Physical Review Letters*, vol. 105, DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.046001.
- [30] S. Schneider, K. Holzmann, and S. Ulrich. Efforts to establish standardized methods to characterize electrorheological suspensions – An interim report focusing on flow mode characterization. page 012011, 2013. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 412 ; DOI: 10.1088/1742-6596/412/1/012011.
- [31] C. Wolff-Jesse and G. Fees. Examination of flow behaviour of electrorheological fluids in the flow mode. 1998. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 212, p. 159-173, DOI: 10.1243/0959651981539370.
- [32] Ke Zhang, Ying Dan Liu, Myung S. Jhon, and Hyoung Jin Choi. Generalized yield stress equation for electrorheological fluids. 2013. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 409, p. 259-263; DOI: 10.1016/j.jcis.2013.08.003.

- [33] Martin Gurka, Raino Petričević, Steffen Schneider, and Stephan Ulrich. Characterization of Step Response Time and Bandwidth of Electrorheological Fluids. 2011. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, p. 1745-1748; DOI: 10.1177/1045389X11425280.
- [34] Heinrich Vogelmann. *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauingenieure Teil I: Einführung in die Elektrotechnik*. 2001. Skriptum zur Vorlesung ; Universität Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut.
- [35] Christoph Stiller. *Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik*. 2006. *Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik*, Shaker Verlag, Aachen; ISBN: 978-3-8322-5582-4.
- [36] Matthias Worgull. *Hot embossing: theory and technology of microreplication*. 2009. *Micro & nano technologies*, vol. 7, William Andrew, Oxford, 1. ed; ISBN: 978-0-8155-1579-1.
- [37] Volker Schulze. *Fertigungs- und Werkstofftechnik*. 2013. Vorlesung Produktentstehung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für angewandte Materialien.
- [38] Ulrich Hilleringmann. *Mikrosystemtechnik: Prozessschritte, Technologien, Anwendungen*. 2006. Teubner, Wiesbaden, 1. Aufl.; ISBN: 978-3-8351-0003-9.
- [39] Albert Albers, Ludger Deters, Jörg Feldhusen, Erhard Leidich, Heinz Linke, Gerhard Poll, Bernd Sauer, and Jörg Wallaschek. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. 2008. Waldemar Steinhilper, Bernd Sauer (Hrsg.) ; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 7. Aufl; ISBN: 978-3-540-76646-9.
- [40] Gerd Habenicht. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 2009. VDI-Buch, Springer, Berlin, 6. aktualisierte Aufl; ISBN: 978-3-540-85266-7.
- [41] Gottfried W. Ehrenstein (Hrsg.). *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. 2004. Hanser, München, ISBN: 978-3-446-22668-5.
- [42] Helmut Potente. *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. 2004. Hanser, München, ISBN: 978-3-446-22755-2.
- [43] Jordan Rotheiser. *Joining of plastics: handbook for designers and engineers*. 2009. Hanser, München, 3rd Edition, p. 481-523; ISBN: 978-3-446-40786-2.
- [44] Yue Cheng. *Entwicklung und Herstellung einer chemisch inerten Mikropumpe*. 2005. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikrostrukturtechnik.

- [45] Yi Luo, Zongbo Zhang, Xiaodong Wang, and Yingsong Zheng. Ultrasonic bonding for thermoplastic microfluidic devices without energy director. 2010. *Microelectronic Engineering*, vol. 87, p. 2429-2436; DOI: 10.1016/j.mee.2010.04.020.
- [46] Brigitte Altmann, Ralf Ahrens, Alexander Welle, Heinz Dinglreiter, Marc Schneider, and Andreas Schober. Microstructuring of multiwell plates for three-dimensional cell culture applications by ultrasonic embossing. 2012. *Biomedical Microdevices*, vol. 14, p. 291-301; DOI: 10.1007/s10544-011-9605-8.
- [47] J. Sackmann, K. Burlage, C. Gerhardy, B. Memering, S. Liao, and W.K. Schomburg. Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices. 2015. *Ultrasonics*, vol. 56, p. 189-200; DOI:10.1016/j.ultras.2014.08.007.
- [48] Branson Ultrasonic Corporation. Part Design for Ultrasonic Welding. 2013.
- [49] Dietmar Findeisen and Franz Findeisen. *Ölhydraulik: Handbuch für die hydrostatische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik*. 2006. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 5., neu bearbeitete Aufl; ISBN: 978-3-540-23880-5.
- [50] Peige Shao, Zeno Rummeler, and Werner Karl Schomburg. Polymer micro piezo valve with a small dead volume. 2004. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, p. 305-309; DOI: 10.1088/0960-1317/14/2/020.
- [51] Albert Albers, Ludger Deters, Jörg Feldhusen, Erhard Leidich, Heinz Linke, Gerhard Poll, Bernd Sauer, and Jörg Wallaschek. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. 2008. Waldemar Steinhilper, Bernd Sauer (Hrsg.) ; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Aufl; ISBN: 978-3-540-76653-7.
- [52] Alexander Czechowicz and Sven Langbein. *Shape Memory Alloy Valves Basics, Potentials, Design*. 2015. Springer International Publishing, Cham; ISBN: 978-3-319-19081-5.
- [53] Christof Megnin. *Formgedächtnis-Mikroventile für eine fluidische Plattform*. 2014. *Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie*, vol. 20, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe; ISBN: 978-3-7315-0121-3.
- [54] K. Sato and M. Shikida. Electrostatic film actuator with a large vertical displacement. 1992. *Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, IEEE, Travemünde; DOI: 10.1109/MEMSYS.1992.187681.
- [55] Xue'en Yang, Alexander Hölke, Staurt A Jacobson, Jeffrey H Lang, Martin A Schmidt, and Stephen D Umans. An Electrostatic, On/Off Microvalve Designed for Gas Fuel

- Delivery for the MIT Microengine. 2004. *Journal of microelectromechanical Systems*, vol. 13, p. 660-668; DOI: 10.1109/JMEMS.2004.832184.
- [56] Ju Yeoul Baek, Ji Young Park, Jong Il Ju, Tae Soo Lee, and Sang Hoon Lee. A pneumatically controllable flexible and polymeric microfluidic valve fabricated via in situ development. 2005. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, p. 1015-1020; DOI: 10.1088/0960-1317/15/5/017.
- [57] T. Thorsen, Sebastian J. Maerkl, and Stephen R Quake. Microfluidic Large-Scale Integration. 2002. *Science*, vol. 298, p. 580-584; DOI: 10.1126/science.1076996.
- [58] Hidekuni Takao, Makoto Ishida, and Kazuaki Sawada. A Pneumatically-Actuated Silicon Microvalve and its Application to Functional Fluidic Integrated Circuits. 2001. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, E. Obermeier (ed.), *Transducers '01 Eurosensors XVp.* 918-921 DOI: 10.1007/978-3-642-59497-7\_217.
- [59] William H Grover, Alison M Skelley, Chung N Liu, Eric T Lagally, and Richard A Mathies. Monolithic membrane valves and diaphragm pumps for practical large-scale integration into glass microfluidic devices. 2003. *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 89, p. 315-323; DOI: 10.1016/S0925-4005(02)00468-9.
- [60] Seoung-Eun Kim. Konzeption und prototypische Fertigung einer nicht-invasiven mikrofluidischen Plattform für die Elektrophysiologie (NIMEP) zur Zellenanalyse. 2015. *Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie*, vol. 31, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe; ISBN:978-3-7315-0378-1.
- [61] Bocong Yang, Boxiong Wang, and Werner Karl Schomburg. A thermopneumatically actuated bistable microvalve. 2010. *Journal of Micromechanics and Microengineering*; vol. 20; p. 095024-095031; DOI: 10.1088/0960-1317/20/9/095024.
- [62] Christiane Neumann. Entwicklung einer Plattform zur individuellen Ansteuerung von Mikroventilen und Aktoren auf der Grundlage eines Phasenüberganges zum Einsatz in der Mikrofluidik. 2013. *Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie*, vol. 15, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe; ISBN: 978-3-86644-975-6.
- [63] M. Zaun. Design Concept for the Development of Cylinder Drives based on Electro-rheological Fluids. 2006. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 17, p. 303-307; DOI: 10.1177/1045389X06053782.
- [64] Xu Luning, Li Han, Li Yufei, Rong Shen, and Lu Kunquan. Operational durability of a giant ER valve for Braille display. 2017. *Smart Materials and Structures*, vol. 26, 054003; DOI: 10.1088/1361-665X/aa64c4.

- [65] Teppei Tsujita, Masanori Kobayashi, and Masami Nakano. Design and development of a braille display using micro actuators driven by ER suspension. 2010. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 33, p. 1661-1669; DOI: 10.3233/JAE-2010-1298.
- [66] Xize Niu, Weijia Wen, and Yi-Kuen Lee. Electrorheological-fluid-based microvalves. 2005. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, 342501; DOI: 10.1063/1.2140070.
- [67] Joon-Wan Kim, Kazuhiro Yoshida, Kumiko Kouda, and Shinichi Yokota. A flexible electro-rheological microvalve (FERV) based on SU-8 cantilever structures and its application to microactuators. 2009. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 156, p. 366-372; DOI: 10.1016/j.sna.2009.10.013.
- [68] Y-M Han, K-G Sung, J W Sohn, and S-B Choi. Performance comparison of electrorheological valves with two different geometric configurations: Cylinder and plate. 2009. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, p. 573-581; DOI: 10.1243/09544062JMES1175.
- [69] M. Siegfarth. Hydraulic Miniature Actuators Controlled by Electrorheological Fluid. 2018. *Actuator 2018: 16th International Conference on New Actuators, Conference Proceedings*, VDE VERLAG GMBH, p. 467-470; ISBN: 978-3-8007-4675-0.
- [70] ERF Produktion Würzburg GmbH. Datenblatt RheOil 3.0, 2010.
- [71] Ulrich Fischer, Roland Gomeringer, Max Heinzler, Roland Kilgus, Friedrich Näher, Stefan Oesterle, Heinz Paetzold, and Andreas Stephan. *Tabellenbuch Metall*. 2005. Verlag Europa Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 43. Auflage; ISBN: 978-3-8085-1723-9.
- [72] Wilfried Hesser (Hrsg.). *Technisches Zeichnen: Grundlagen, Normen, Beispiele, darstellende Geometrie ; Lehr-, Übungs- und Nachschlagewerk für Schule, Fortbildung, Studium und Praxis*. 2009. Cornelsen Verlag Skriptor, Berlin, 32. überarb. und aktualisierte Auflage; ISBN: 978-3-589-24132-3.
- [73] Holm Altenbach, Johannes Altenbach, and Konstantin Naumenko. *Ebene Flächentragwerke: Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*. 2016. Springer Vieweg, Berlin, 2. Auflage; ISBN: 978-3-662-47230-9.
- [74] Friedrich U. Mathiak. *Ebene Flächentragwerke II Grundlagen der Plattentheorie*. 2008. Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich: Bauingenieur- und Vermessungswesen.



# Anhang

## Eigene Veröffentlichungen:

Talaeieh Rajabi, Tim Finkbeiner, Ralf Ahrens, **Ruben Garschagen**, Andreas E. Guber; *Introduction of polyethelene terephthalate (PET) enabling the fabrication of in vitro models for medical or pharmaceutical applications*; MicroTAS 2018, Kaohsiung, Taiwan.

## Betreute Studentische Arbeiten

Evaluation von Herstellverfahren für mikrofluidische Systeme  
Johannes Kraft, 2017, Technische Hochschule Bingen

Entwicklung eines elektrostatischen Low-Cost-Ventils zur Verwendung in einer Ventilmatrix  
Thorben Bühner, 2018, Karlsruher Institut für Technologie

Untersuchung und Fertigung thermoplastischer Mikrobauteile mittels Ultraschallprägen  
Moritz Koschitzky, 2018, Karlsruher Institut für Technologie

Ultraschallschweißen ohne Energierichtungsgeber  
Timo Reuter, 2018, Karlsruher Institut für Technologie

Development of a modular microdebubblers  
Yijie Xiang, 2018, Karlsruher Institut für Technologie

## Verwendete Geräte und Materialien

### Prüfstand

Gerät	Modell	Bemerkung
Drucksensoren	Bürkert 8316	0-4 bar und 0-10 bar
Drucksensor	Keller Serie M5 HB	Schalten der Ventilmatrix
Temperatursensoren	PT 100	
Volumenstromsensor Q1	Bürkert Typ 8071 mit Transmitter 8025	0,5 l/h bis 100 l/h
Volumenstromsensor Q2	Sensirion SLQ-QT500	kleine Volumenströme ( $\pm 120 \frac{ml}{min}$ )
Filter	Pall 25 mm In-Line Filter Holder, Stainless Steel	mit Netz aus rostfreiem Stahl mit 100 $\mu m$ Maschenweite
Zahnradpumpe	TCS Micropumps MGD 1000 P	
Schläuche	PU 6 x 4 mm	Im ERF Kreislauf verwendet
Temperiereinheit	Julabo HE und Julabo FP50	

### Verwendete Materialien für Testchip, Ventil und Matrix

UV-Klebstoff	Dymax 1187-M	
Leitfähiger Klebstoff	Epoxy Technology H20E-PFC 10z	
Membran Ventil	FKM	200 $\mu m$ dick
Polycarbonat	Covestro Makrolon UV	
Membranmaterial Matrix	Gerlinger Pulyurethanfolie 4140 A	Dicke: 200 $\mu m$
Klebstoff für Matrix zum Einkleben von Platine und Membran	UHU Plus Black	Zweikomponenten Epoxidharzklebstoff (thixotrop)



