



**Ostfalia**

Hochschule für angewandte  
Wissenschaften

Ostfalia Fakultät Fahrzeugtechnik

# Labor Elektronische Fahrzeugsysteme

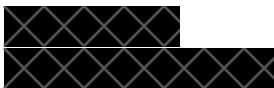
## Versuch 3: Magnetventil

Prüfer:  
Prof. Dr. M. Kolbus

Bearbeitet von:



Durchgeführt am:  
12. Mai 2022

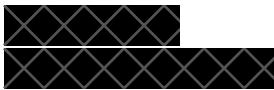


## Inhaltsverzeichnis

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | Erläuterung des Funktionsprinzips eines Magnetventils.....                       | 1  |
| 2 | Erläuterung der Ansteuerung eines Magnetventils .....                            | 2  |
| 3 | Erläuterung des Einflusses der Induktivität im Magnetventil .....                | 3  |
| 4 | Erläuterung der Abweichung zum normalen Aufladevorgang der Spule .....           | 5  |
| 5 | Versuchsaufbau.....  | 6  |
| 6 | Versuchsdurchführung.....  | 7  |
| 7 | Auswertung: Bestimmung des Spulenwiderstands $R_{CU}$ und Induktivität $L$ ..... | 9  |
| 8 | Auswertung: Analyse des zum Öffnen benötigten Stroms $I_{öffnen}$ .....          | 9  |
| 9 | Auswertung: Analyse der zum Öffnen benötigten Zeit $t_{öffnen}$ .....            | 11 |

## Abbildungsverzeichnis

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1  | Prinzipieller Aufbau eines Magnetventils.....                                       | 1  |
| Abbildung 2  | Schaltbild Magnetventil .....   | 2  |
| Abbildung 3  | Rechtecksignal als Ansteuerungssignal .....   | 2  |
| Abbildung 4  | Schaltkreis mit Motorsteuergerät und Feldeffekttransistor .....                     | 3  |
| Abbildung 5  | Auf- und Entladevorgang einer Induktivität.....                                     | 4  |
| Abbildung 6  | Abweichung zum idealen Aufladevorgang der Spule .....                               | 5  |
| Abbildung 7  | Versuchsaufbau Feldeffektransistorschaltung .....                                   | 6  |
| Abbildung 8  | Rechtecksignal als Ansteuerungssignal .....   | 6  |
| Abbildung 9  | Shunt Spannung $U_{SH}$ , sowie Betriebsspannung $U_B$ von Oszilloskop erfasst..... | 7  |
| Abbildung 10 | Beispiel Oszilloskopbild mit abzulesenden Werten.....                               | 8  |
| Abbildung 10 | Tabelle der Messwerte.....  | 8  |
| Abbildung 11 | Diagramm $I_{öffnen}$ .....   | 9  |
| Abbildung 13 | Gleichung um $t_{öffnen}$ zu bestimmen .....  | 11 |
| Abbildung 12 | Diagramm der notwendigen Zeit $t_{öffnen}$ für das Öffnen des Ventils.....          | 12 |
| Abbildung 13 | Beschleunigung des Ventils in Abhängigkeit von Magnet und Federkraft.....           | 12 |
| Abbildung 14 | Formel für Zeitkonstante $\tau$ .....   | 12 |



## 1 Erläuterung des Funktionsprinzips eines Magnetventils

Das in diesem Laborversuch verwendete Magnetventil dient als Einspritzventil eines Verbrennungsmotors.

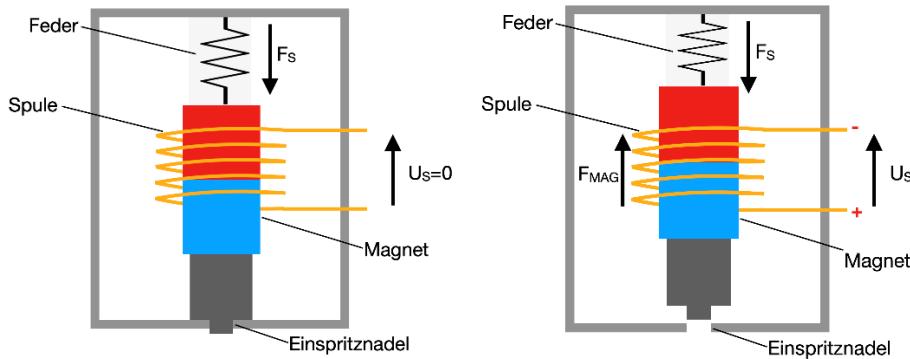


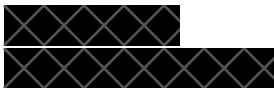
Abbildung 1 Prinzipieller Aufbau eines Magnetventils

Die obige Abbildung 1 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Magnetventils dar. Wenn keine Spannung anliegt ( $U_s=0$ ), wird die Einspritznadel von der Feder (mit der Kraft  $F_0$ ) in die Öffnung des Ventils reingedrückt, sodass diese geschlossen bleibt. Somit befindet sich das Ventil in einem geschlossenen Zustand.

Liegt jedoch eine Spannung  $U_s$  über der Spule an, entsteht in der Spule ein elektromagnetisches Feld. Zwischen dem Magnetfeld des Magnets und dem der Spule, resultiert eine Kraft  $F_{MAG}$  die der Federkraft  $F_0$  entgegenwirkt. Ist die Magnetkraft  $F_{MAG}$  größer als die Federkraft  $F_0$ , so wird der Magnet, samt Einspritznadel, von der Magnetkraft hochgedrückt. Dieser Vorgang kann mit der vereinfachten Gleichung

$$m \cdot \ddot{x} = F_{MAG} - F_0$$

beschrieben werden, wobei  $x$  die Position,  $F_{MAG}$  die Magnetkraft zwischen der Spule und dem Magnet und  $F_0$  die Federkraft beschreibt.



Das Magnetventil kann mithilfe eines üblichen Schaltbildes einer Elektrischen Spule beschrieben werden.

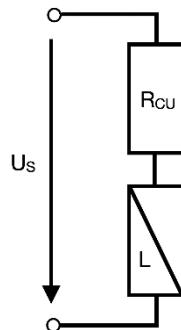


Abbildung 2 Schaltbild Magnetventil

## 2 Erläuterung der Ansteuerung eines Magnetventils

Wird ein solches Magnetventil in einem Verbrennungsmotor als Einspritzventil eingesetzt, so muss es bei jedem Ansaugtakt über einen bestimmten Zeitpunkt Kraftstoff in den Zylinder reinlassen. Dazu ist eine präzise Steuerung erforderlich. In modernen Verbrennungsmotoren im Kraftfahrzeughbereich geschieht diese Steuerung mit einem Motorsteuergerät, welches in festen Intervallen ein Ansteuerungssignal liefert. In diesem Laborversuch wird dieses Periodische Signal mit einem Rechtecksignal realisiert.

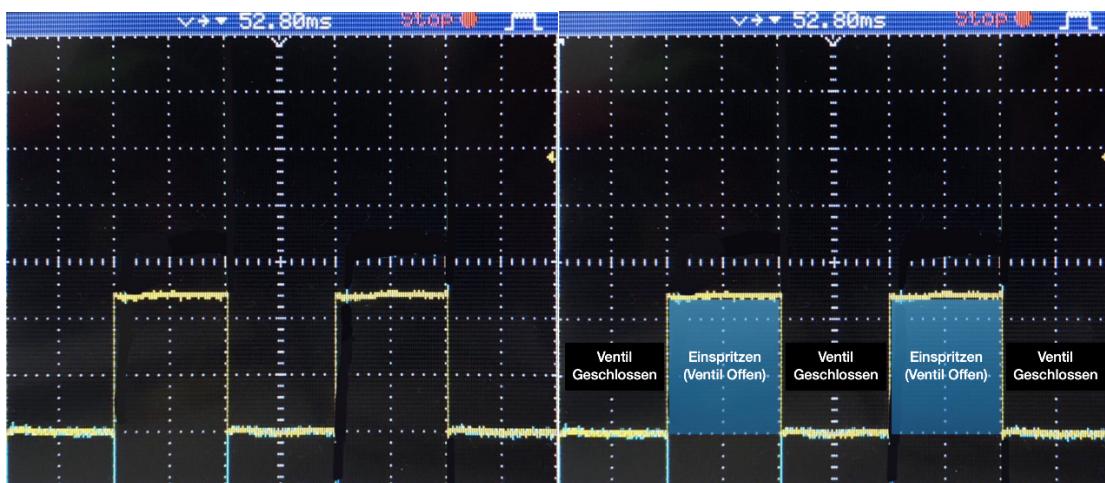


Abbildung 3 Rechtecksignal als Ansteuerungssignal

Dieses Rechtecksignal wird an einem Feldeffekttransistor übergeben, welches das Magnetventil ansteuert. Somit wird der Vollständige Schaltkreis eines Magnetventils wie folgt beschrieben:

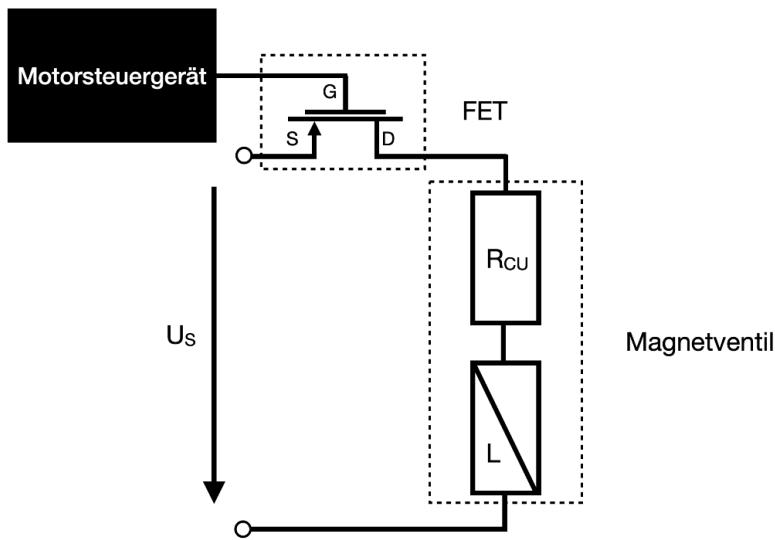
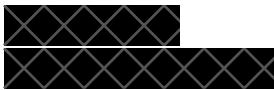


Abbildung 4 Schaltkreis mit Motorsteuergerät und Feldeffekttransistor

### 3 Erläuterung des Einflusses der Induktivität im Magnetventil

Eine Induktive Spule, wie in dem Magnetventil eingesetzt ist, benötigt eine gewisse Zeit, um ein Magnetfeld aufzubauen. Der Aufbau eines Elektromagnetischen Feldes wird als Aufladevorgang bezeichnet, und der Zusammenbruch als Entladevorgang. Für diese Vorgänge gelten die Formeln

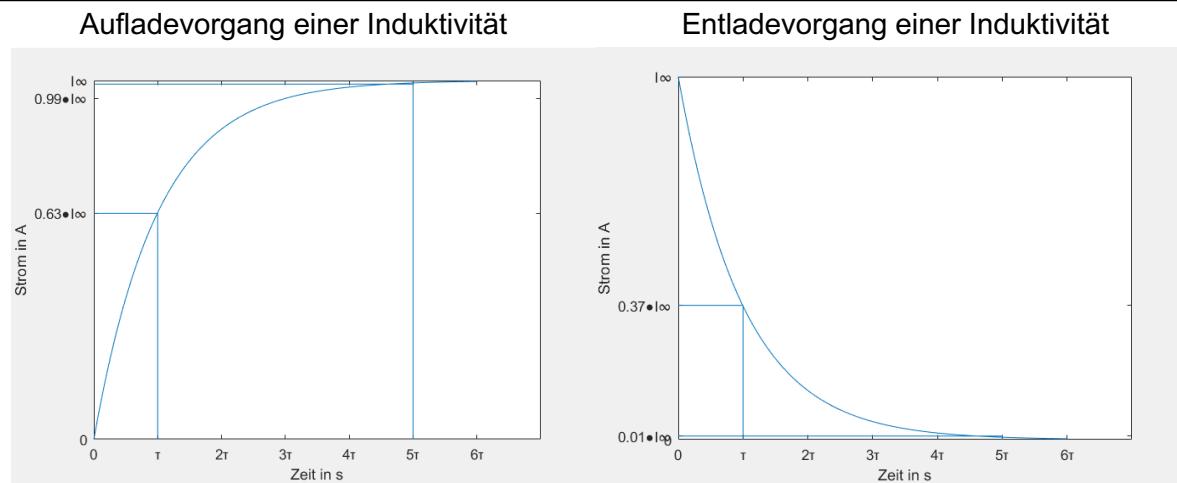
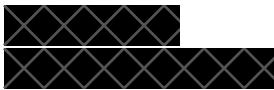
$$i_L(t) = \frac{U_S}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i_L(t) = \frac{U_S}{R} (e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$i_L(t)$  beschreibt die in der Spule fließenden, zeitabhängigen Strom, beim Einschaltvorgang einer Spule.

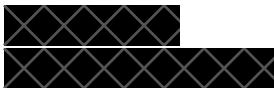
$i_L(t)$  beschreibt die in der Spule fließenden, zeitabhängigen Strom, beim Ausschaltvorgang einer Spule.

Die Zeitkonstante  $\tau$  ist beim Ent- und Aufladevorgang ausschlaggebend. Bei  $1 \tau$  ist der Aufladevorgang zu 63% fertig, bei  $5 \tau$  ist dieser zu 99% fertig. Bei fertigem Aufladevorgang fließt ein konstanter Strom  $I_\infty = \frac{U_S}{R}$ , und der Induktive Spannungsabfall wird 0.



**Abbildung 5 Auf- und Entladevorgang einer Induktivität**

Aufgrund dieser Verzögerung beim Auf- und Entladevorgang, geschieht das Öffnen und Schließen des Magnetventils auch mit einer entsprechenden Verzögerung. Es geschieht jedoch auch ein anderer Effekt, der bei dem Öffnen- und Schließvorgang betrachtet werden muss: wenn sich das Ventil öffnet, verändert sich der Magnetfluß schlagartig, sodass ein Einsturz des Magnetfeldes geschieht.



## 4 Erläuterung der Abweichung zum normalen Aufladevorgang der Spule

Die Zeitkonstante  $\tau_0$  wird mit der Gleichung

$$\tau = \frac{L}{R}$$

beschrieben, wobei die Induktivität  $L$  mit der Gleichung

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I}$$

beschrieben wird.  $\Phi$  beschreibt den Magnetischen Fluss,  $N$  die Wicklungsanzahl und  $i$  den Strom. Der Fluß ist Materialabhängig. Im Falle des Einspritzventils bleibt der Magnetische Fluss weitgehend konstant, bis sich das Ventil öffnet. Die Abbildung 1 zeigt, wie sich, sobald das Ventil öffnet, der Metallener Ventilkörper von dem Metallenen Gehäuse trennt. Das hat den Effekt, dass sich der magnetische Fluss schlagartig verringert. Das Magnetfeld bricht kurzzeitig zusammen, und der Aufladevorgang der Spule wird unterbrochen. Dies führt beim Aufladevorgang zu einer Abweichung von dem in Abbildung 5 dargestellten Verhalten.

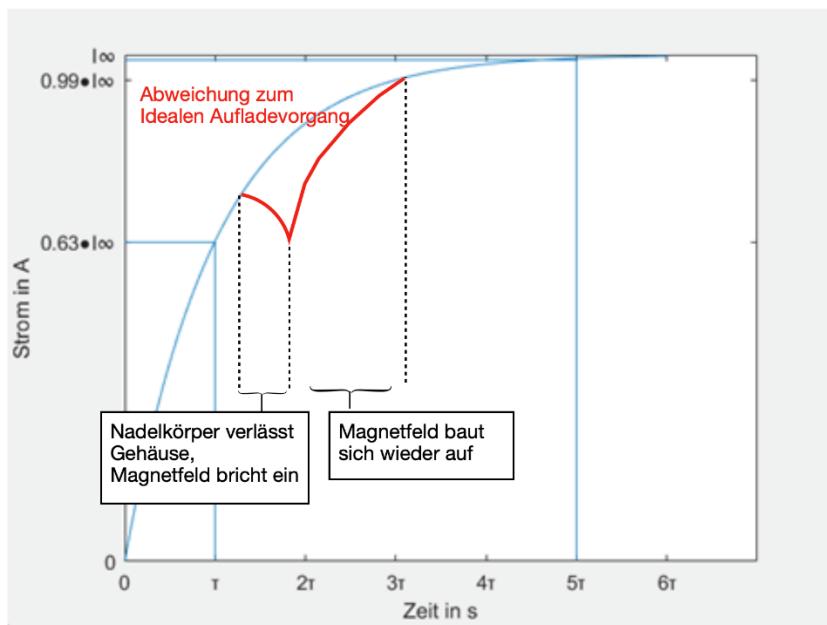
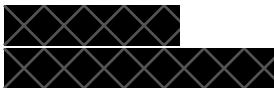


Abbildung 6 Abweichung zum idealen Aufladevorgang der Spule



## 5 Versuchsaufbau

Ziel dieses Versuches war es das Verhalten eines Magnetventils, unter Berücksichtigung der o.g. Effekten, bei verschiedenen Spannungen zu untersuchen. Hierzu wurde eine einfache Feldeffekttransistorschaltung aufgebaut.

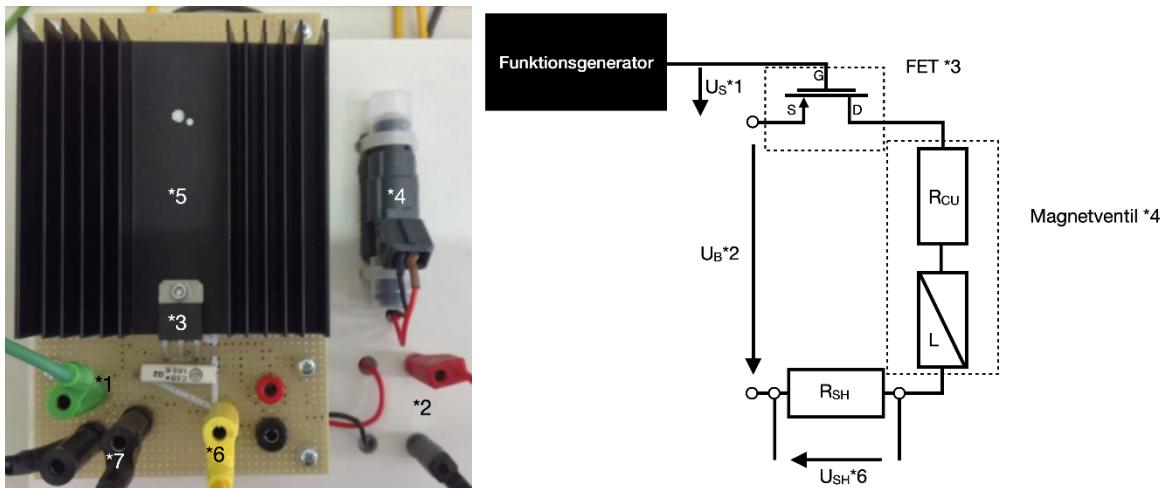


Abbildung 7 Versuchsaufbau Feldeffekttransistorschaltung

Diese Schaltung wird von einer Betriebsspannung  $U_B$  \*2 betrieben, und von einem Steuersignal  $U_s$  \*1 angesteuert. Als Steuersignal dient ein Rechtecksignal mit 25kHz Frequenz, und einer Amplitude  $\hat{U}_{s+}$  von 12V welches von einem Funktionsgenerator erzeugt wird (siehe Abbildung 8). Dieses Steuersignal steuert die Ventilschaltung über den Feldeffekttransistor \*3, welches mit einem überdimensionierten Kühlkörper \*5 versehen ist.

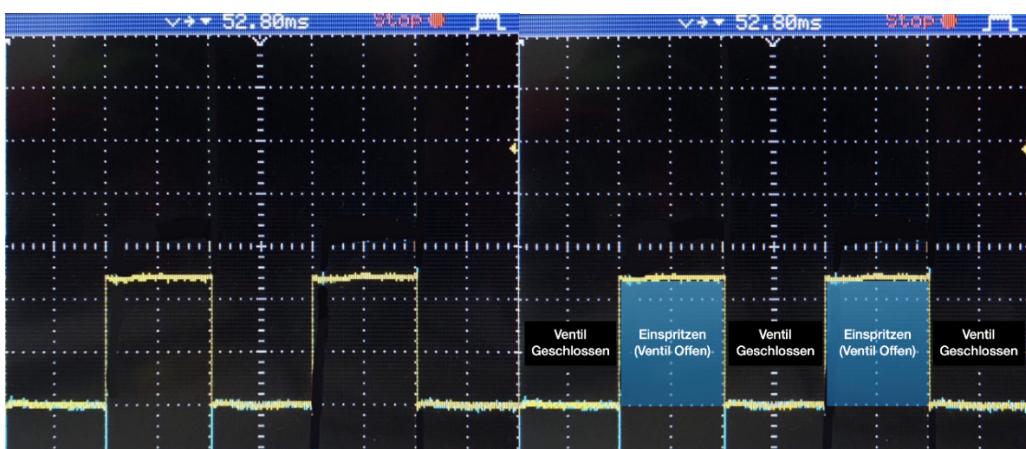
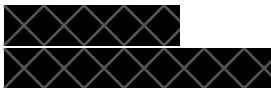


Abbildung 8 Rechtecksignal als Ansteuerungssignal



## 6 Versuchsdurchführung

Die Bemessung des Stroms  $i_L$  bzw.  $I_\infty = \frac{U_B}{R_{SH} + R_{CU}}$  die durch die Schaltung fließt geschieht mithilfe einer Shunt-Strommessung. Der Spannungsabfall  $U_{SH} * 6$  über dem Widerstand  $R_{SH}$  wurde von einem Oszilloskop erfasst und ausgewertet. Der Strom lässt sich aus der Formel

$$i_L = i_{SH} = \frac{U_{SH}}{R_{SH}}$$

berechnen. Da der in diesem Laborversuch verwendete Shunt-Widerstand einen Wert von  $1\Omega$  besitzt ergibt sich der Strom aus:

$$I_{SH} = \frac{U_{SH}}{1\Omega}$$

Dieser Strom beinhaltet jedoch auch den Widerstand  $R_{SH}$  und weicht somit von dem gesuchten Stromwert ab. Um dafür zu kompensieren, muss der Stromverlust aufgrund des Shunt-Widerstandes von dem gemessenen Stromwert abgezogen werden.

$$I_{SH,Verlust} = I_{\infty,reel} - I_{\infty,gemessen} = \frac{U_B}{R_{CU}} - \frac{U_B}{R_{CU} + R_{SH}}$$

Den Spannungsabfall über dem Widerstand  $U_{SH} * 6$ , sowie Betriebsspannung  $U_B * 2$  konnten mit einem Oszilloskop abgelesen werden.

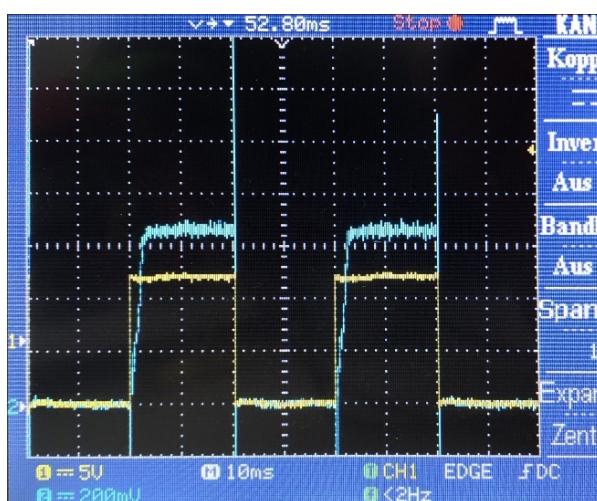
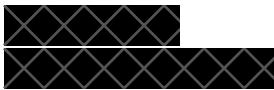


Abbildung 9 Shunt Spannung  $U_{SH}$  (Blau), sowie Betriebsspannung (Gelb)  $U_B$  von Oszilloskop erfasst



Der Versuch wurde über verschiedene Betriebsspannungswerte  $U_B$  ausgeführt, sodass die Betriebsspannung  $U_B$ , Endstrom  $I_\infty$  sowie Strom  $i_{\text{öffnen}}$  und Zeit  $t_{\text{öffnen}}$ , bei der sich das Ventil geöffnet hat dokumentiert werden konnten. Diese Werte konnten von dem Oszilloskop Bild abgelesen werden (siehe Abbildung 10).

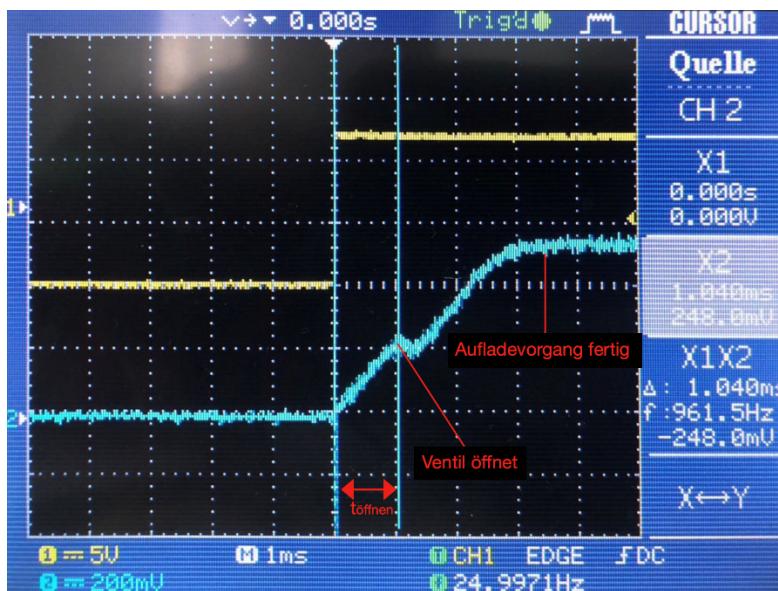
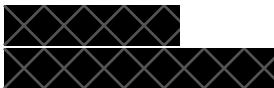


Abbildung 10 Beispiel Oszilloskopbild mit abzulesenden Werten

Die abgelesenen Spannungswerte, sowie die daraus berechneten Stromwerte wurden in der untenliegenden Tabelle eingetragen. Wichtig zu erwähnen ist, dass bei dem Messvorgang die Spannungssignale ziemlich unrein waren, sodass die Genauigkeit der Messung nicht besonders hoch ist.

| $U_B$ in V | $I_\infty$ in mA | $U_{sh\infty}$ in mV | $i_{\text{öffnen}}$ in mA | $t_{\text{öffnen}}$ in ms |
|------------|------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 14         | 682              | 650                  | 256                       | 0,920                     |
| 13         | 629              | 600                  | 250                       | 1,000                     |
| 12         | 576              | 550                  | 230                       | 1,120                     |
| 11         | 537              | 512                  | 220                       | 1,160                     |
| 10         | 493              | 470                  | 210                       | 1,136                     |
| 9          | 463              | 440                  | 200                       | 1,560                     |
| 8          | 421              | 400                  | 200                       | 1,720                     |
| 7          | 380              | 360                  | 190                       | 1,800                     |
| 6          | 316              | 300                  | 180                       | 2,240                     |
| 5          | 274              | 260                  | 175                       | 3,080                     |
| 4,5        | 265              | 250                  | 170                       | 3,200                     |
| 4          | 233              | 220                  | 160                       | 4,400                     |
| 3,5        | 201              | 190                  | 145                       | 6,000                     |

Abbildung 10 Tabelle der Messwerte



## 7 Auswertung: Bestimmung des Spulenwiderstands $R_{CU}$ und Induktivität $L$

Die Messergebnisse die aus den Betriebsspannungswerten unter 3,5V resultierten wurden nicht eingetragen, da das Ventil unter 3,5V nicht mehr öffnet. Dadurch dass sich das Ventil bei diesen Werten nicht öffnet, kommt es bei der Induktivität zu keiner Abweichung vom normalen Aufladevorgang (siehe Abbildung 6). Damit können die Bauteilwerte der Induktivität wie folgt bestimmt werden:

$$R_{CU} = \frac{U_B}{I_{SH,\infty}} - R_{SH}$$

Die obige Formel wurde über alle in der Tabelle eingetragenen Werte verwendet um daraus einen Mittelwert des Spulenwiderstand  $R_{CU} = 19\Omega$  zu berechnen. Damit kann die Induktivität  $L$  der Spule mit der Abgelesenen Zeitkonstante  $\tau$  bei  $U_B=3V$  bestimmt werden:

$$L = \tau \cdot R = 2,800ms \cdot (R_{CU} + R_{SH}) = 2,800ms(19\Omega + 1\Omega) = 56mH$$

## 8 Auswertung: Analyse des zum Öffnen benötigten Stroms $I_{\text{öffnen}}$

### $I_{\text{öffnen}}$ über verschiedene Betriebsspannungswerte

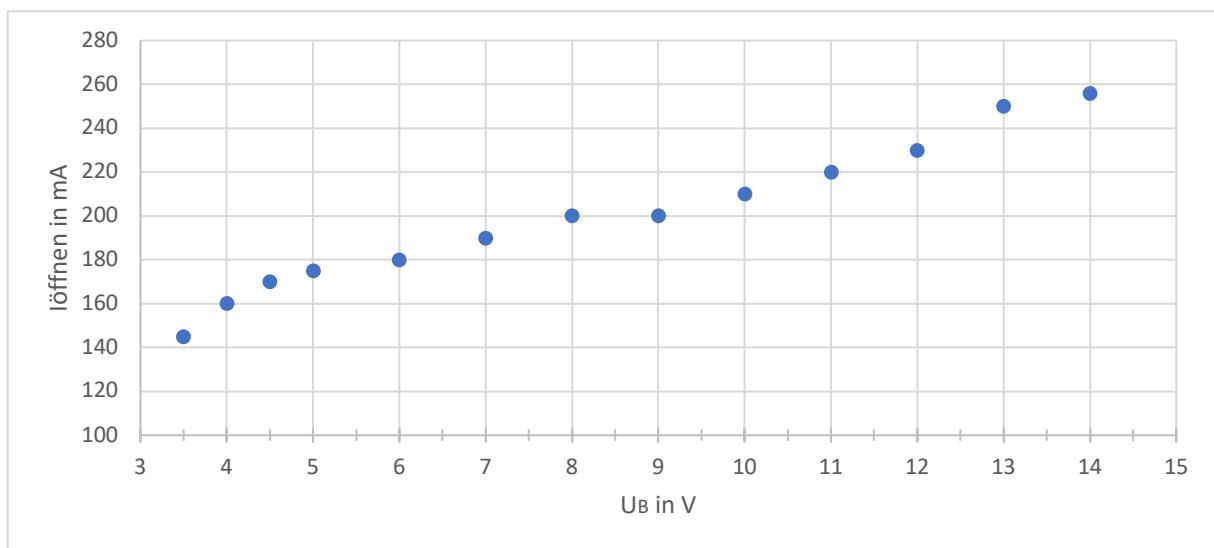
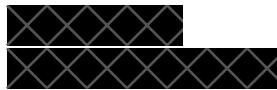


Abbildung 11 Diagramm  $I_{\text{öffnen}}$



### Versuch 3: Magnetventil

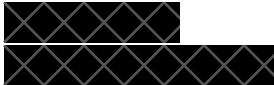


Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften

Die Abbildung 11 stellt den, für das Öffnen des Ventils notwendigen, Strom  $I_{\text{öffnen}}$  dar. Bei diesem Stromwert ist der Aufladevorgang der Spule so weit dass die Federkraft  $F_0$  von der Magnetkraft  $F_{\text{MAG}}$  überwunden wird, sodass sich das Ventil öffnet. Sichtbar ist, dass dieser Strom bei höherer Betriebsspannung leicht steigt.

In der Aufgabenstellung wird der Mittelwert der Stromwerte bei Öffnen des Ventils über  $U_B=8..14V$  gefragt:

$$I_{\text{öffnen,Mittelwert}} = 223mA$$



## 9 Auswertung: Analyse der zum Öffnen benötigten Zeit $t_{\text{öffnen}}$

Die zum Öffnen benötigte Zeit  $t_{\text{öffnen}}$  ist auch von Interesse. Diese beschreibt die Zeitverzögerung zwischen dem Ansteuerungssignal und dem Öffnen des Ventils (siehe Abbildung 10). Diese Verzögerung kann mithilfe der Gleichung

$$i_L(t) = \frac{U_B}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

berechnet werden.  $i_L$  beschreibt hier den zeitabhängigen Strom, der durch die Schaltung fließt,  $R$  den Gesamtwiderstand der Schaltung,  $U_B$  die an der Schaltung anliegenden Spannung und  $\tau$  die Zeitkonstante der Spule. Somit gilt für den Strom  $i_{\text{öffnen}}$  bei dem das Ventil öffnet

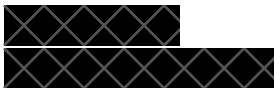
$$i_{\text{öffnen}} = \frac{U_B}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t_{\text{öffnen}}}{\tau}} \right)$$

Diese Gleichung kann wie folgt nach der Öffnungszeit umgeformt werden:

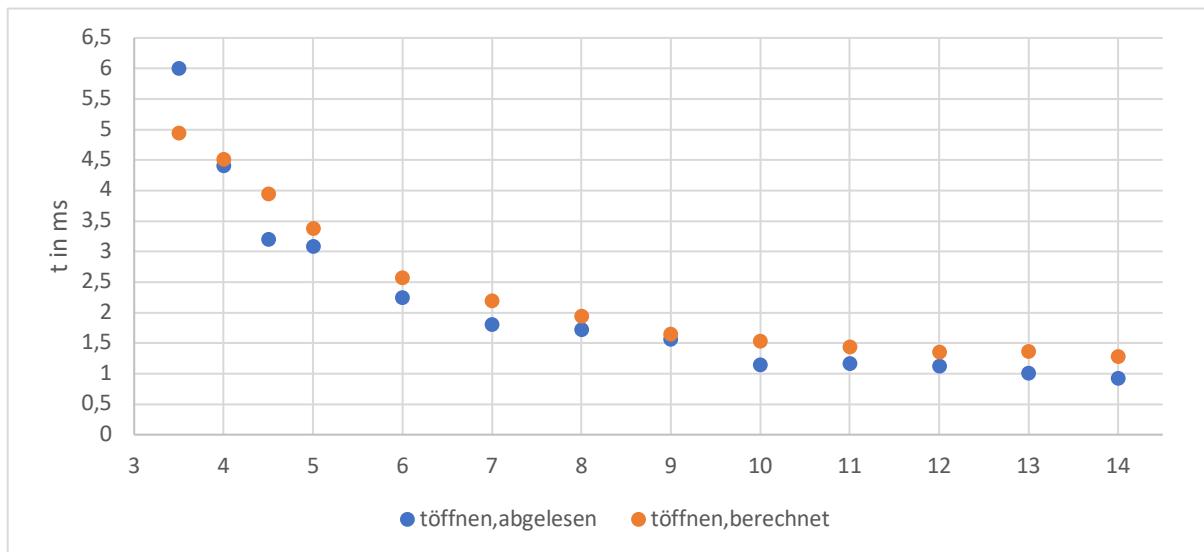
$$t_{\text{öffnen}} = -\tau \cdot \ln \left( 1 - \frac{R}{U_B} i_{\text{öffnen}} \right)$$

**Abbildung 13 Gleichung, um  $t_{\text{öffnen}}$  zu bestimmen**

Der Stromwert  $i_{\text{öffnen}}$  ist von einigen Parametern, u.a. Reibung, Federkraft  $F_0$  und Druck, abhängig die hier aber nicht weiter betrachtet werden sollen. Daher ist diese Gleichung vorerst ausreichend. Nun können aus den abgelesenen Stromwerten (aus der Tabelle in Abbildung 10) mithilfe der obigen Gleichung (Abbildung 13) die Zeitwerte  $t_{\text{öffnen}}$  bestimmt werden und, zum Vergleich, in einem Diagramm mit den Abgelesenen Werten für  $t_{\text{öffnen}}$  über verschiedene Betriebsspannungswerte dargestellt werden.



**t<sub>öffnen,berechnet</sub> und t<sub>öffnen,abgelesen</sub> über verschiedene Betriebsspannungswerte**



**Abbildung 12 Diagramm der notwendigen Zeit t<sub>öffnen</sub> für das Öffnen des Ventils über verschiedene Betriebsspannungswerte**

Sichtbar ist, dass die zum Öffnen benötigte Zeit t<sub>öffnen</sub> bei kleineren Betriebsspannungswerten von  $U_B < 6V$  deutlich größer ist als bei höheren. Zudem ist sichtbar, dass die zum Öffnen benötigte Zeit bei  $U_B > 6V$  weitgehend konstant bleibt.

Das liegt daran, dass bei niedrigeren Spannungswerten die Magnetkraft noch gering im Verhältnis zur Federkraft ist. Somit entsteht zusätzlich zur Verzögerung des Aufladevorgangs eine Verzögerung aufgrund der verringerten Beschleunigung des Ventils.

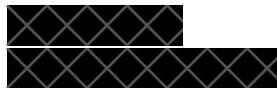
$$m \cdot \ddot{x} = F_{MAG} - F_0$$

**Abbildung 13 Beschleunigung des Ventils  $\ddot{x}$  in Abhängigkeit von Magnet  $F_{MAG}$  und Federkraft  $F_0$**

Bei höheren Spannungswerten wird diese zusätzliche Verzögerung immer geringer, sodass die Verzögerung hauptsächlich von dem Aufladevorgang resultiert, welches über alle Spannungswerte konstant ist.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

**Abbildung 14 Formel für Zeitkonstante  $\tau$**



Versuch 3:  
Magnetventil



Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften

---

Die geringe Abweichung zwischen den Berechneten und gemessenen Werten bestätigt die Zuverlässigkeit der Messergebnisse.