

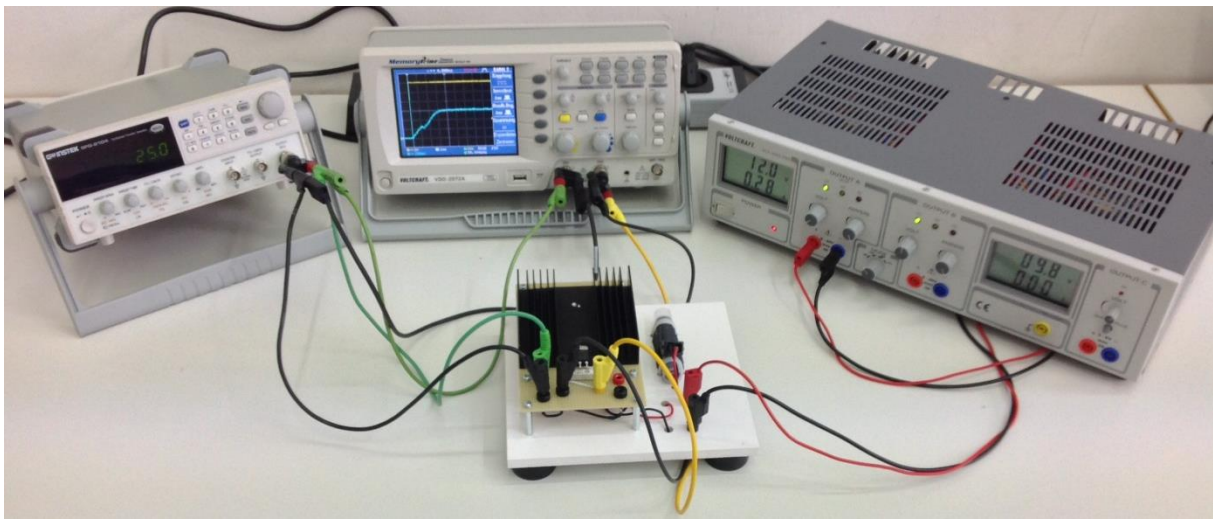


Versuch 3: Magnetventil

Magnetventile beruhen auf dem Grundprinzip des Linearmagneten. In Fahrzeugen werden diese als Ventile für Fahrdynamik-Regelungen (ABS, ESP, aktive Fahrwerke), Hydrauliksysteme und Motorsteuerungen (Einspritzung) verwendet, ferner ohne Ventilfunktion als Öffner/Schließer für mechanische Bauelemente (z.B. Türschlösser).

Ziel dieses Versuches ist die Beobachtung der elektrischen Eigenschaften eines Magnetventils unter verschiedenen Bedingungen und die Bestimmung des zeitlichen Verhaltens bezüglich Öffnungszeiten durch Messung und Berechnung.

Dabei verwendet wir ein simples Einspritzventil, da dessen elektromechanische Eigenschaften eine Untersuchung mit einfachen Messmethoden erlauben.



1. Vorbetrachtungen

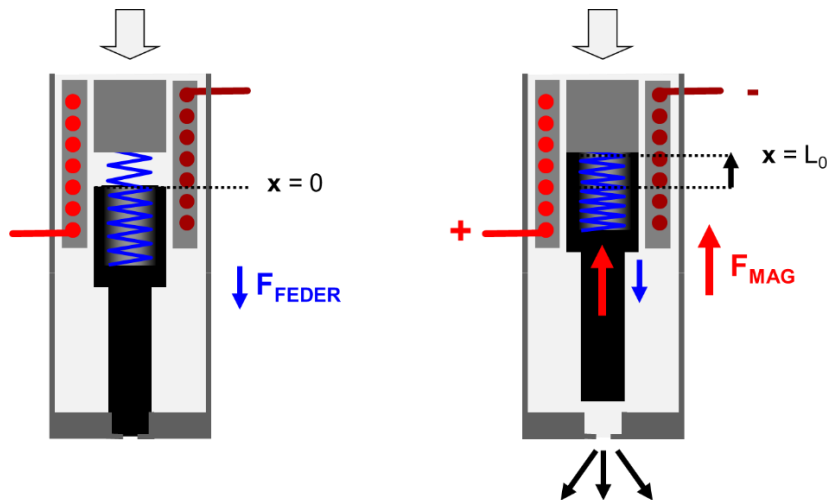


Bild 1: Schnittbild eines Magnetventils (hier Einspritzventil) nach dem Prinzip des Linearmagneten

- Eine mögliche Bauform eines Magnetventils ist das Einspritzventil. Dies besteht aus einem Ventilkörper, in dem sich eine Magnetwicklung und eine Führung für die Düsennadel befinden, und einer Düsennadel mit Magnetanker. Magnetventile z.B. in Fahrdynamiksystemen funktionieren nach demselben Funktionsprinzip.
- Wenn das Steuergerät die Magnetwicklung mit einer Spannung beaufschlägt, hebt sich die Düsennadel von ihrem Ventilsitz ab und gibt eine Präzisionsbohrung frei. (Funktionsprinzip des „Linearmagneten“)
- Sobald die Spannung wegfällt, wird die Düsennadel durch eine Feder auf den Ventilsitz zurückgedrückt und verschließt die Bohrung.

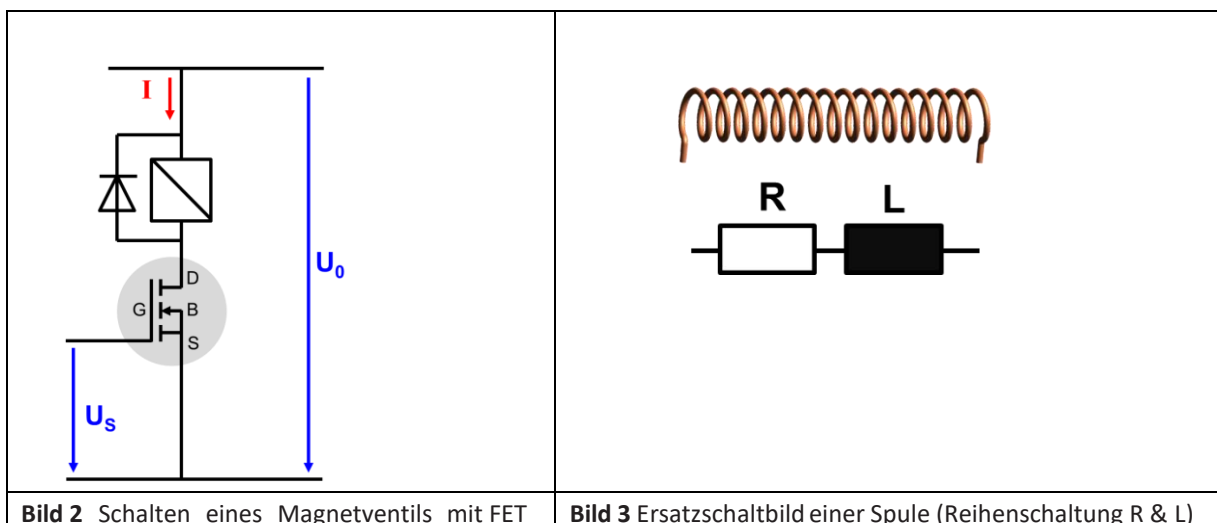




Bild 2 zeigt eine typische Ansteuerung eines elektromagnetischen Ventils mittels eines Feldeffekttransistors (FET). Es ist zu beachten, dass alle elektromagnetischen Schaltelemente wegen der eingebauten Induktivität L eine Zeitkonstante besitzen.

Es gilt: Das Magnetventil reagiert auf den Ein- und Ausschaltimpuls mit einer gewissen Zeitverzögerung, weil der Spulenstrom $i(t)$ und somit die magnetische Kraft F_{MAG} sich aufgrund der Selbstinduktion verzögert auf- bzw. abbaut.

Berechnung des (idealen) zeitlichen Spulenstromverlaufes beim Einschalten:

Zur Berechnung der Zeitkonstanten des Stromverlaufs beim Einschalten wird das Ersatzschaltbild einer Spule aus Widerstand und Induktivität herangezogen (Bild 3). Die Reihenschaltung aus Widerstand R und Induktivität L stellt den Wicklungswiderstand der Magnetspule des Ventils und deren zugehörige Induktivität dar.

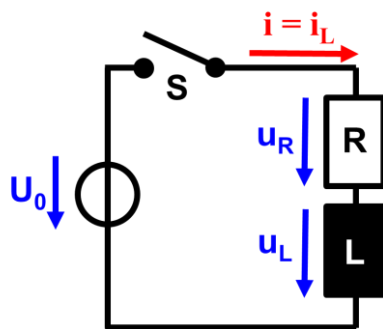


Bild 4: Schaltbild zur Thematik: Einschalten einer Magnetspule.

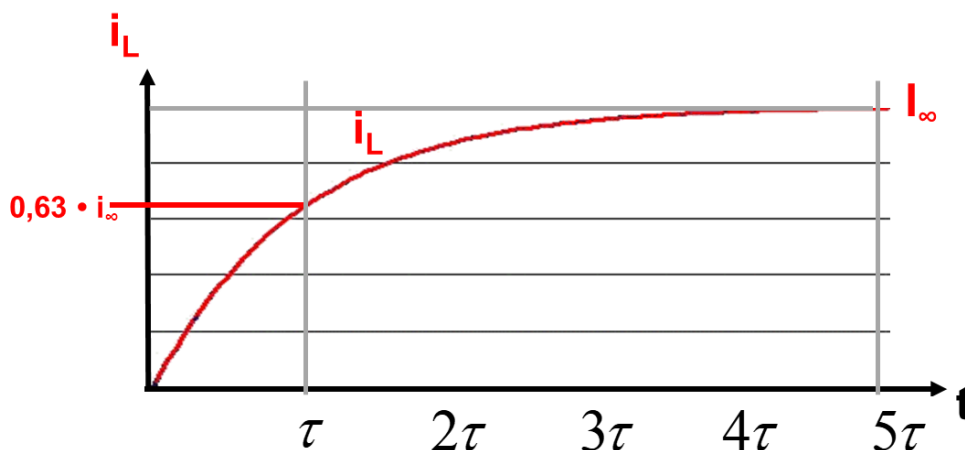


Bild 5: Stromverlauf beim Einschaltvorgang einer (idealen) Magnetspule

Der Transistor kann idealisiert als Schalter S betrachtet werden. Dieser Schalter S wird zum Zeitpunkt $t = 0$ geschlossen, die Induktivität hatte davor keine magnetische Energie gespeichert.



Für die Schaltung mit geschlossenem Schalter gilt:

$$i_L \cdot R + u_L - U_B = 0 \qquad i_L \cdot R + L \cdot \frac{di_L}{dt} - U_B = 0 \qquad i_L + \frac{L}{R} \cdot \frac{di_L}{dt} = \frac{U_B}{R} = I_\infty$$

Mit der Einschaltzeitkonstanten $\tau = \frac{L}{R}$ gilt dann: $i_L + \tau \cdot \frac{di_L}{dt} = \frac{U_B}{R} = I_\infty$

Diese DGL beschreibt also den Einschaltvorgang. Mit den Anfangsbedingungen, dass die Induktivität keinerlei magnetische Energie vor dem Einschalten gespeichert hatte und dass beim Einschalten der Strom $i_L = 0$ ist, lautet die Lösung für den Verlauf des Spulenstroms **I**:

$$i_L = I_\infty \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{mit} \quad I_\infty = U_0 / R$$

Nach der Zeit $t = \tau$ ist der Spulenstrom auf ca. 0,63 des Endwertes angestiegen.

$$i_L(\tau) \approx 0,63 \cdot I_\infty$$

Die in der Spule induzierte Spannung u_L ergibt sich zu

$$u_L = U_B \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

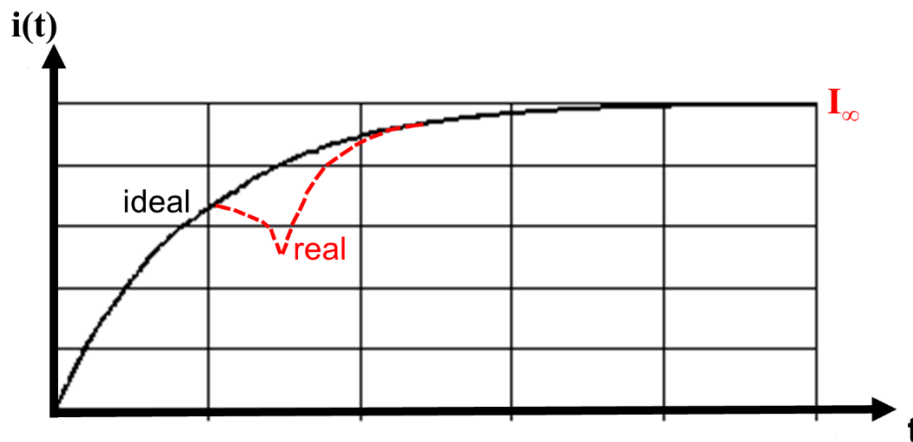


Bild 6: Stromverlauf beim geschalteten Magnetventil (**Abweichung vom Idealfall in rot**)

In Bild 6 wird der Stromverlauf bei einem **realen** Magnetventil dargestellt. Der Einbruch des realen Stromverlaufes beim Einschaltvorgang resultiert aus dem Eindringen des ferromagnetischen Tauchkerns in den Luftspalt: Durch das zusätzliche Eisen im Spulenkern wird die Induktivität der Spule verändert.

Der Beginn des Einbruchs kennzeichnet den Beginn des Öffnungsvorgangs. Der zugehörige Strom sollte theoretisch konstant sein, in der Praxis kann er aber je nach Betriebszustand des Magnetventils leicht variieren (aufgrund von Reibungs- und Temperatureffekten etc.).

Bei der Beendigung des Öffnungsvorgangs schlägt der Tauchkern an, der Magnetkreis wird geschlossen und der Luftspalt verschwindet. Dies bewirkt eine schlagartige Veränderung des magnetischen Flusses Φ und damit über den starken Induktionsspannungspuls einen stärkeren Einbruch.



Messen elektrischer Ströme über einem Messwiderstand („Shunt“)

Der Strom durch einen Verbraucher kann über eine Spannungsmessung an einem in Reihe geschalteten (möglichst kleinen) Messwiderstand („Shunt“) R_{SH} erfolgen. Die an ihm abgegriffene Spannung ist nach dem Ohm'schen Gesetz $I = U / R$ proportional zum fließenden Strom.

Die Größe des Shunts ist bei der Auswertung der Messdaten zu berücksichtigen.

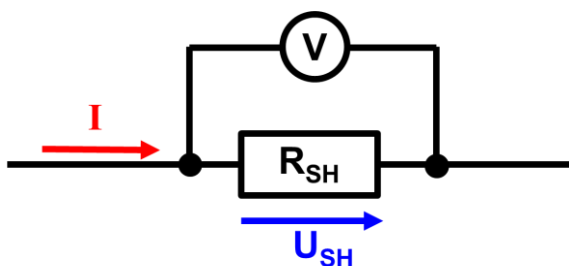


Bild 7: Strommessung mit Hilfe eines Messwiderstandes



2. Ablauf:

- Bilden Sie 2er Gruppen.
- Bereiten Sie den Versuch zu Hause vor, verschaffen Sie sich einen Überblick!
- Falls Hausaufgaben zur Vorbereitung gegeben sind: Bearbeiten Sie diese vorab zu Hause (so weit möglich). Diese Ausarbeitung müssen Sie namentlich kennzeichnen und abgeben (jeder Teilnehmer)!
- Bringen Sie ggf. einen eigenen, leeren USB-Stick zum Abspeichern notwendiger Oszilloskopbilder mit, alternativ eine gute Digitalkamera zum Abfotografieren des Bildschirms.
- Führen Sie die Versuche während der Laborveranstaltung durch.
- **WICHTIG 1: Vor jeder Inbetriebnahme einer Schaltung den Aufbau durch den Laborbetreuer abnehmen lassen! Nach jeder Messung den Betreuer gegenzeichnen lassen.**
- **WICHTIG 2: Das Netzgerät (und auch das Oszilloskop) bleibt während der Versuche eingeschaltet. Beim Umbauen wird die Spannung auf 0 Volt eingestellt. GRUND: Ständiges EIN- und Ausschalten schadet den Geräten.**
- Schreiben Sie im Nachgang einen Versuchsbericht, in dem Sie die geforderten Aufgaben bearbeiten. Abgabe spätestens eine Woche nach Durchführung des Laborversuchs. Die von Ihnen ermittelten Messwerte (Tabellen aus diesem Skript) sind als Anhang mit abzugeben.
- Zu beachten: Diagramme, Maßeinheiten, physikalische Größen, Zahlenwerte z.B. in Tabellen sind normgerecht anzugeben. Siehe gegebene Unterlagen.



3. Geräte und Material:

	<p>Versuchsträger mit zu untersuchendem Magnetventil (Einspritzventil), Schalttransistor und Anschlussbuchsen</p> <p>Rechts: Einspritzventil, unser Messobjekt</p> <p>links oben: Kühlkörper mit Schalttransistor (FET)</p> <p>grüner Anschluss: angelegte Steuerspannung U_s</p> <p>gelber Anschluss: gemessene Shuntspannung U_{sh}</p> <p>roter Anschluss: Betriebsspannung U_B</p> <p>schwarze Anschlüsse: Bezugspotenzial (0V)</p>
	<p>Messwiderstand „(Shunt)“</p> <p>$R_{sh} = 1\Omega$ zur Messung des Ventilstroms</p> <p>Dieser Widerstand ist in Reihe mit dem Ventil geschaltet, die an ihm abgegriffene Spannung ist nach $I = U / R$ proportional zum fließenden Strom.</p>
	<p>Funktionsgenerator zur Erzeugung der Steuerspannung U_s</p> <p>Kurvenform: Rechteck</p> <p>Frequenz: 25 Hz</p> <p>Amplituden: $\hat{U}_+ = 12V$, $\hat{U}_- = 0V$</p>
	<p>Spannungsversorgung: Dreifach-Labornetzteil</p> <p>OUTPUT A: Ventilspannung $U_B = 3,5 \dots 14V$</p>
	<p>Digitales Speicheroszilloskop:</p> <p>Kanal 1 (gelb): Steuerspannung U_s vom Funktionsgenerator</p> <p>Kanal 2 (blau): Am Shunt R_{sh} gemessene Spannung U_{sh} (proportional zum Strom durch das Magnetventil)</p>



Name	Matrikelnr.

4. Aufgaben:

Stellen Sie vor Beginn der Messungen die Steuerspannung U_s am Funktionsgenerator ein (siehe Kap. 3).

Kurvenform:

Frequenz: $f =$ Hz

Amplituden von U_s : $\hat{U}_{s+} =$ Volt, $\hat{U}_{s-} =$ Volt

Stellen Sie die Betriebsspannung am Labornetzteil auf $U_B = 14V$ ein.

Ausnahme: Verbindungskabel zum Labornetzteil!

Nehmen Sie den Aufbau mit dem Laborbetreuer in Betrieb.

Zeichnen Sie mit dem Oszilloskop ein Bild mehrerer Perioden des Ansteuersignals (Spannung U_s) auf.



4.1 Messen des Stromverlaufs beim gepulsten Einschalten des Einspritzventils.

- Skizzieren Sie die Schaltung des Versuchsaufbaus.
- Machen Sie einen Screenshot bei $U_B = 14 \text{ V}$ und interpretieren Sie das Schirmbild.
- Messen Sie bzw. berechnen Sie die Größen wie in Tabelle 1 gefordert.
 (für $U_B = 14 \dots 5 \text{ V}$ in 1,0 Volt-Schritten, $U_B < 5 \text{ V}$ in 0,5V-Schritten)

Lfd. Nr.	U_B in V	$U_{sh \infty}$ in mV	I_{∞} in mA	$i_{\text{öffnen}}$ in mA	$t_{\text{öffnen}}$ in s
1	14,0				
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					

Tabelle 1

Betreuer:



- Beschreiben Sie in Ihrem Bericht auf Grundlage Ihrer Messwerte **kurz** den qualitativen Zusammenhang von U_B , I_∞ , $i_{\text{öffnen}}$ und $t_{\text{öffnen}}$.
- Wie groß ist der notwendige Strom $i_{\text{öffnen}}$ bei $U_B = 8 \dots 14 \text{ V}$ (Mittelwert)?

$\overline{i_{\text{öffnen}}} = \quad \text{mA}$



4.2 Bestimmung des ohmschen Widerstands R_{CU} und der Induktivität L der Spule des Magnetventils

4.2.1

Bestimmen Sie R_{CU} mit Hilfe der in Tabelle 1 ermittelten Werte und den zugehörigen Gleichungen aus Teil 1. Die Toleranz von R_{SH} (5%) und der Spannungsabfall am durchgeschalteten FET ($< 1\%$ von U_{SH}) sind bei der Berechnung von R_{CU} zu vernachlässigen.

- Beschreiben Sie formelmäßig Ihre Berechnungsmethode.

$R_{CU} =$ Ohm

4.2.2.

- In welchem Spannungsbereich funktioniert das Ventil nicht mehr?

→ Erklären Sie dieses Verhalten anhand der allgemeinen Eigenschaften eines Magnetventils.

- Bestimmen Sie die Induktivität der Spule des **geschlossenen** Magnetventils aus den ermittelten Werten der Tabelle 1 und den zugehörigen Gleichungen aus Teil 1. Benutzen Sie zur Berechnung nur die Werte, bei denen das Ventil geschlossen bleibt (notwendiges $i_{\text{öffnen}} > I_{\infty}$).

- Beschreiben Sie formelmäßig Ihre Berechnungsmethode.

$L =$ mH



4.3 Darstellung der Öffnungszeit des Magnetventils in Abhängigkeit von der Betriebsspannung.

- Leiten Sie den mathematischen Zusammenhang zwischen Einspritzbeginn $t_{\text{öffnen}}$ und Betriebsspannung U_B her (mit Hilfe der entsprechenden Gleichungen aus Teil 1 und den bis hierhin ermittelten Werten).
- Stellen Sie in einem Diagramm Ihre gemessenen Öffnungszeiten $t_{\text{öffnen}}$ in Abhängigkeit von U_B dar.
- Tragen Sie in das gleiche Diagramm Ihre berechneten Werte ein.
- Vergleichen Sie beide Ergebnisse.