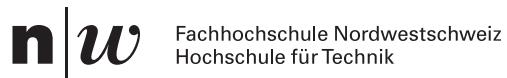


Fachbericht Projekt 5 EIT

Detroit Electric Car

Umrüsten eines Detroit Electric Car von 1918 auf Li-Ion Batterien



Autoren:

Yanick Frei
Marc Müller

Auftraggeber:

Urs Jäger

Fachcoach:

Felix Jenni

Windisch, 27. April 2017

Version: 1.0

Abstract

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.0.1. Berechnungen zur Batterie	2
1.0.2. Steuerung der Geschwindigkeit	3
1.0.3. Steuerplatine	8
1.0.4. Schaltvorgänge und -zustände	9
2. Schlussfolgerung	10
3. Literaturverzeichnis	11
A. Anhang	12

1 Einleitung

1.0.1. Berechnungen zur Batterie

Bei der Batterie sind vor allem der maximale Kurzschlussstrom sowie die maximale Verlustleistung von Interesse, da diese für die Sicherung und die Kühlung relevant sind.

Mittels $\frac{dU}{dT}$ -Messung konnte der Innenwiderstand der Batterie bestimmt werden. Dabei wurde eine Messung im Leerlauf und eine bei einem Strom von ca. 50 A durchgeführt, wobei diese Messung für zwölf in Serie geschaltete Zellen durchgeführt wurde. Die Messung ergab einen Innenwiderstand von $20 \text{ m}\Omega$, deswegen wird zur Sicherheit mit folgenden Werten gerechnet:

- $15 \text{ m}\Omega$ als schlimmster Fall für den Kurzschluss (maximaler Kurzschlussstrom)
- $24 \text{ m}\Omega$ als schlimmster Fall für die Verlustleistung (maximale Abwärme)

Da jeweils drei Stränge zu 12 Zellen parallel geschaltet sind ergibt sich ein Widerstand von:

$$R_B = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = 5 \text{ m}\Omega \text{ bzw. } 8 \text{ m}\Omega$$

Die Abwärme berechnet sich gemäss der Formel $P = I^2 \cdot R$ (für diese Berechnungen wird der Wert von $8 \text{ m}\Omega$ benutzt), dies soll zuerst für einen konstanten Ladestrom von 10 A berechnet werden:

$$P_{V,Laden} = (10 \text{ A})^2 \cdot 8 \text{ m}\Omega = 0.8 \text{ mW}$$

Für den maximalen Fahrstrom ergibt sich eine Abwärme von:

$$P_{V,Max} = (100 \text{ A})^2 \cdot 8 \text{ m}\Omega = 80 \text{ W}$$

Der schlimmste Fall eines Kurzschlusses ist ein Kurzschluss direkt an den Klemmen der Batterie. In diesem Fall wird der Stromfluss nur durch die Spannung der Batterie beschränkt. Im schlimmsten Fall muss mit der Ladeschlussspannung und einem kleinen Innenwiderstand der Batterie gerechnet werden, der Kurzschlussstrom berechnet sich gemäss $I = \frac{U}{R}$ zu:

$$I_k = \frac{12 \cdot 4.2 \text{ V}}{5 \text{ m}\Omega} = 10800 \text{ A}$$

1.0.2. Steuerung der Geschwindigkeit

Im Detroit kann die Geschwindigkeit mittels eines Steuerhebels mit fünf Positionen ausgewählt werden. Um dabei die Funktion die Funktion von Stufenschalter und Motor zu verstehen ist es unabdingbar, zu Beginn einen Blick auf die Funktionsweise des Motors zu richten. Anschliessend werden die verschiedenen Schaltungen, die mit dem Stufenschalter realisierbar sind, vorgestellt.

Funktion des Reihenschlussmotores

Grundsätzlich ist der verwendete Motor ein Gleichstrommotor. Für diesen Motor sind die beiden Gleichungen 1.1 und 1.2 ausschlaggebend, welche die Funktion des idealen Ankers beschreiben (k steht dabei für eine Maschinenkonstante, die die Konstruktion des Motors zusammenfasst):

$$M_{el} = k \cdot \Phi_E \cdot I_A \quad (1.1)$$

$$U_i = k \cdot \Phi_E \cdot \omega_{me} \quad (1.2)$$

Wichtig ist die Bemerkung, dass diese Gleichungen für den idealen Anker gelten. Bei einem realen Motor addiert sich zur induzierten Spannung U_i noch die Spannung über dem ohmschen Ankerwiderstand $R_A \cdot I_A$. Außerdem entstehen im Motor selbst Reibungen, die das verfügbare mechanische Drehmoment reduzieren (beispielsweise Lager oder Lüfter).

Wird angenommen, dass die Nichtlinearitäten klein sind im Vergleich zum idealen Modell kann gesagt werden, dass der Strom proportional zum Moment und die Spannung proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Mit dem Erregerfluss Φ_E können dabei beide Größen beeinflusst werden:

- Bei erhöhtem Erregerfluss wird das Moment pro Strom grösser, jedoch die Winkelgeschwindigkeit pro Spannung kleiner
- Bei verringertem Erregerfluss wird die Winkelgeschwindigkeit pro Spannung grösser, jedoch das Moment pro Strom kleiner

Über einen veränderlichen Erregerfluss können also gezielt Moment und Geschwindigkeit aneinander angepasst werden. Genau dieses Verhalten wird im Reihenschlussmotor ausgenutzt. Bevor jedoch auf dessen Funktion eingegangen wird, soll der schematische Aufbau des Reihenschlussmotors in Abbildung 1.1 erläutert werden.

Der Erregerfluss ist dabei vom Erregerstrom abhängig, wie in Formel 1.3 gezeigt ist:

$$\Phi_E = \frac{L_E}{N_E} \cdot I_E \quad (1.3)$$

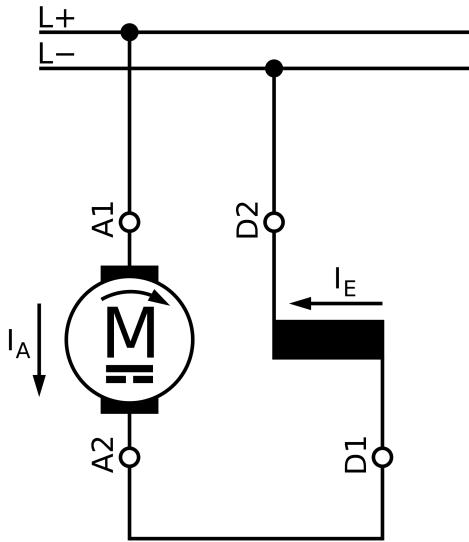


Abbildung 1.1.: Elektrisches Schema eines Reihenschlussmotors [1]

Da durch Anker und Erregerwicklung der selbe Strom fliest, also $I_A = I_E$ gilt, sieht man sehr gut, dass bei sinkendem Stromfluss zum einen das Moment aufgrund von Formel 1.1 kleiner wird, zum anderen das Moment auch durch die schwächere Erregung (aufgrund des geringeren Stromes) kleiner wird. Das Moment ist also quadratisch abhängig vom Stromfluss. Wird ausserdem die weitere Maschinenkonstante $c = k \cdot \frac{L_E}{N_E}$ gesetzt, resultieren für die ideale Reihenschlussmaschine die beiden Formeln 1.4 und 1.5:

$$M_{el} = c \cdot I^2 \quad (1.4)$$

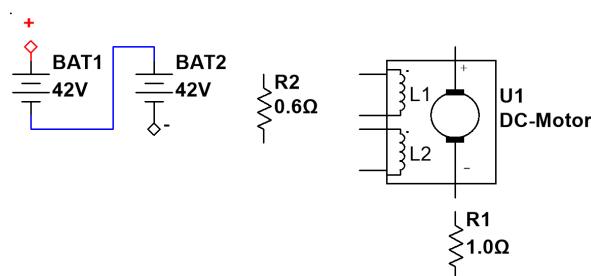
$$\omega_{me} = \frac{U_i}{c \cdot I} \quad (1.5)$$

Da auch bei der Reihenschlussmaschine der ohmsche Spannungsabfall über Anker- und Erregerwicklung einen zum Strom proportionalen Spannungsabfall bewirkt stellt sich für jede angelegte Spannung automatisch ein Gleichgewicht zwischen Drehzahl und Drehmoment ein. Dies erlaubt jedoch weder eine vernünftige Regelung der Geschwindigkeit noch ist es in jedem möglichem Arbeitspunkt besonders effizient.

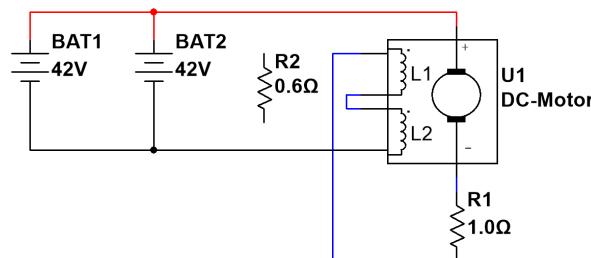
Um diese Probleme anzugehen wird mit der sogenannten Feldschwächung gearbeitet: Bei niedrigen Drehzahlen, wo hohes Moment gefordert ist, wird die Erregung komplett in Serie zum Anker geschaltet. Sind bei höheren Drehzahlen nicht mehr so hohe Momente benötigt, wird ein Teil des Stromes "an der Erregerwicklung vorbei" geleitet, sodass die Erregung zusätzlich geschwächt wird. Dies wird als Feldschwächung bezeichnet.

Funktion des Stufenschalters

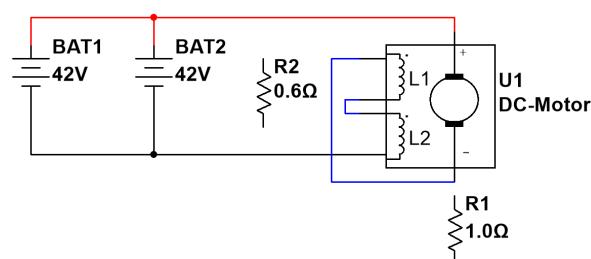
Diese Effekte, die beim Reihenschlussmotor bereits vorgestellt wurden, werden vom Stufenschalter gesteuert. Dies ist zum einen die Spannung über dem Motor, zum anderen ist auch eine mögliche Feldschwächung möglich. Im Folgenden sollen die fünf Fahrstufen sowie die ursprüngliche Ladestufe vorgestellt werden.



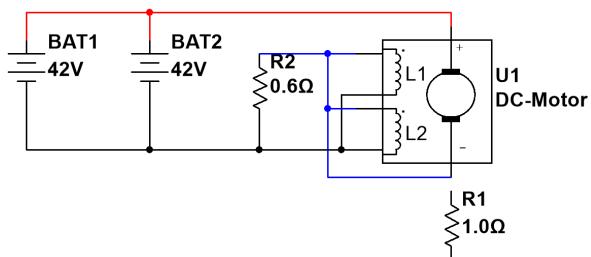
Stufe: Laden In der Nullstellung des Stufenschalters ist die Batterie im Lademodus. Dazu sind beide Batterien in Serie geschalten, sodass beide Batterien mit dem selben Strom geladen werden. Sämtliche Komponenten des Motors sowie die beiden Widerstände sind nicht angeschlossen. Diese Stufe ist auch nach dem Umbau des Detroits weiterhin vorhanden. Das serielle Laden der beiden Batterien wird aber durch die verbauten Dioden verhindert.



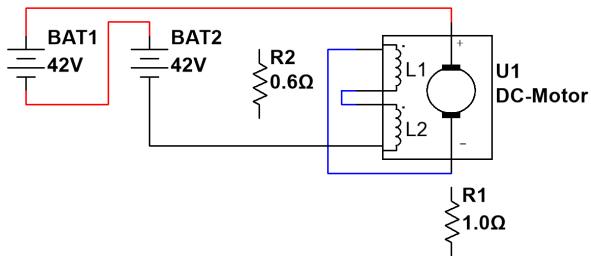
Stufe: Eins In der ersten Fahrstufe werden die beiden Batterien parallel geschaltet, wodurch zum einen die Spannung verringert wird, zum anderen auch der für grosse Momente benötigte Strom geliefert werden kann. Um ein maximales Moment zu erreichen sind beide Feldwicklungen in Serie angeschlossen, wodurch durch beide der volle Fahrstrom fließt. Außerdem ist zur Begrenzung des Anlaufstromes (da im ersten Moment die induzierte Spannung $U_i = 0V$ beträgt) der Widerstand R_1 in Serie geschaltet.



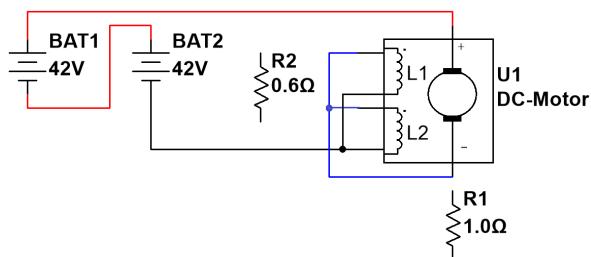
Stufe: Zwei Die zweite Stufe ist fast gleich aufgebaut wie die erste. Auch hier wird für ein möglichst grosses Moment die Serieschaltung der Erregerwicklung sowie die paralellschaltung der Batterien verwendet. Der einzige Unterschied zur ersten Fahrstufe ist, dass der Anfahrwiderstand R_1 überbrückt und somit funktionslos ist. Durch den weggefallenen Spannungsabfall über dem Anfahrwiderstand wird die erreichbare induzierte Spannung grösser, ohne dabei das erreichbare Moment zu reduzieren.



Stufe: Drei In der dritten Stufe wird nun erstmals von der Feldschwächung Gebrauch gemacht. Die beiden Erregerwicklungen sind nicht mehr seriell, sondern paralell geschaltet. Außerdem ist der Widerstand R_2 paralell zu den beiden Erregerwicklungen geschaltet. Durch diese Parallelschaltung ist der Stromfluss in der Erregerwicklung und damit die Erregung selbst deutlich kleiner als in den vorherigen Fahrstufen, wodurch eine höhere Winkelgeschwindigkeit bei reduziertem Moment ermöglicht wird. Die beiden Batterien sind weiterhin parell geschaltet.



Stufe: Vier In der vierten Fahrstufe wird die Spannung durch Serieschaltung der Batterien erhöht. Um weiterhin grosse Kräfte zu ermöglichen, wird die Erregerwicklung wieder von parallel nach seriell verschaltet, wodurch keine Feldschwächung realisiert wird. Stufe vier ist deswegen sehr ähnlich aufgebaut wie Stufe zwei, jedoch sind aufgrund der verdoppelten Spannung höhere Leistungen erzielbar als in Stufe zwei. Es ist gut möglich, dass bei den ursprünglichen Blei-Batterien dieser Leistungszuwachs bei hohen Strömen durch den Innenwiderstand der Batterien zum Teil wieder ausgeglichen wurde, bei den modernen Lithium-Ionen-Akkumulatoren kann dies jedoch demontiert werden.



Stufe: Fünf Auch in der fünften und damit höchsten Fahrstufe sind die beiden Batterien für eine höhere Spannung in Serie geschaltet. Hier wird wieder Gebrauch von der Feldschwächung gemacht, indem die beiden Erregerwicklungen parallel geschalten werden und damit der Fluss reduziert wird. Im Gegensatz zur Stufe drei, bei welcher die Erregerwicklungen ebenfalls parallel geschaltet werden, wird hier auf die zusätzliche Parallelschaltung des Widerandes R_2 und damit auf die weitere Reduktion des Feldes verzichtet. Dadurch sollten sich auch noch bei hohen Geschwindigkeiten genügende Momente ergeben.

Die Fahrstufen werden dabei vom Stufenschalter mechanisch geschaltet, indem unter den Kontaktfingern mittels Kupferplatten Kontakte verbunden (und damit beispielsweise Widerstände

überbrückt) werden. Die Lagen dieser Kupferplatten ist im Originalschema zu finden, wie es im Anhang unter zu finden ist. Ausserdem ist ein Blick in das Innere des Stufenschalters in Abbildung 1.2 gegeben:

Anhang
erstellen



Abbildung 1.2.: Blick in den geöffneten Stufenschalter

Glücklicherweise befand sich der Stufenschalter in einem guten Zustand, sodass lediglich etwas Staub entfernt werden musste. Ausserdem wurde ein Teil der Verkabelung erneuert, sodass diese ebenfalls am Stufenschalter befestigt wurden.

1.0.3. Steuerplatine

Um die Kommunikation zu und von den beiden Steuerplatinen zu implementieren wurde eine sogenannte Steuerplatine erstellt. Diese regelt sämtliche Funktionen, welche mit dem BMS zu tun haben. Das Schema dieser Steuerplatine ist im Anhang unter zu finden. Dort sind einzelne Bereiche eingefärbt, auf welche im Folgenden eingegangen werden soll.

Anhang

Gelb: Anschlüsse Die gelb hinterlegten Komponenten bilden die Verbindung zu den weiteren Komponenten. Mit Ausnahme der 12 V-Zuleitung wurden sämtliche Verbindungen als Schraubklemmen ausgeführt. Lediglich Letztere wurde aufgrund des grossen Stromes und der benachbarten Montage direkt aufgelötet. Die einzelnen Verbindungen erfüllen folgende Aufgaben:

- **BMS1 / BMS2:** Verbindung zum ersten und zweiten Batteriemanagementsystem
- **12Fahren:** Die 12 V-Spannungsversorgung, wenn das Fahrzeug eingeschaltet ist
- **Voltmeter:** Verbindung zur Batteriestandanzige
- **Hauptschalter:** Verbindung zu den Spulenkontakten des Hauptschalters
- **230:** Verbindung zum 230 VAC-Eingang sowie den beiden Ladegeräten
- **Luefter1 / Luefter2:** Verbindung zu den beiden Lüftern

Rot: Spannungsversorgung Die Spannungsversorgung regelt, wie der Name bereits andeutet, die Versorgung der Steuerung mit Spannung. Dabei sind die beiden Fälle für das eingeschaltete Fahrzeug (Zustand "Fahren") sowie für den Zustand "Laden" zu unterscheiden.

Beim Zustand **Fahren** wird die gesamte Steuerung über den im Fahrzeug eingebauten DC-DC-Wandler versorgt, der ausserdem die Beleuchtung mit Spannung beliefert. In diesem Zustand sind sämtliche Funktionen verfügbar. Ausserdem werden die 24 V des BMS durch die Diode D_1 und den Spannungswandler U_3 bereitgestellt. Die Dioden sorgen dabei für die Trennung der beiden Spannungswandler.

Beim **Laden** ist es wichtig, dass das Fahrzeug nicht eingeschaltet werden kann. Damit wird verhindert, dass unwillentlich mit dem noch eingesteckten Fahrzeug losgefahren wird. Dies wird dadurch sichergestellt, dass das Relais U_4 beim Anschluss von 230 VAC automatisch die Spannungszufuhr für die Steuerung unterbricht. Da jedoch auch beim Laden das BMS eingeschaltet sein soll, wird dieses über einen Spannungswandler vom 230 VAC-Netz versorgt.

Grau: Passive Signale Die beiden passiven Signale umfassen die Information, dass das System eingeschaltet ist beziehungsweise am 230 VAC-Netz angeschlossen ist. Dies sind logische 0 (entspricht < 1 V) und 1 (entspricht > 4 V) Signale. Da bei beiden Zuständen jeweils eine

eigene 12 V Versorgungsspannung benötigt wird, können die benötigten Signale einfach mittels passivem Spannungsteiler aus diesen Versorgungsspannungen hergestellt werden. Die Signale sind außerdem für beide Batteriemanagementsysteme gleich.

Grün: Relais für die Ladegeräte Das Batteriemanagementsystem steuert die Ladegeräte lediglich dadurch, dass sie ein- und ausgeschaltet werden. Diese Schaltvorgänge werden über die beiden Relais U_1 und U_5 durchgeführt. Dabei ist es wichtig, dass beide Ladegeräte unabhängig gesteuert werden können, entsprechend sind auch einzelne Relais vorhanden.

Violett: Treiberstufe Die Signale des BMS sind zu schwach, um damit direkt ein Relais oder die Lüfter anzusteuern. Aus diesem Grund werden diese Signale mit Hilfe von MOSFETs verstärkt. Da für das Durchschalten der MOSFETs am Gate eine höhere Spannung anliegen muss als am Sourceanschluss, wurde Letzterer mit Masse verbunden und das zu schaltende Bauelement am Drainanschluss angeschlossen. Am Beispiel der ersten Treiberstufe mit Q_3 soll dies erklärt werden:

Vom BMS her wird ein Signal zur Verfügung gestellt, welches das erste Ladegerät ein- beziehungsweise ausschaltet. Dieses Signal wird an den Gateanschluss des Transistors angeschlossen. Damit sich dieser nicht zu schnell auflädt, ist der Widerstand R_7 in Serie dazu geschaltet. Ein kleinerer Widerstand würde zwar eine höhere Schaltgeschwindigkeit erlauben, dies ist jedoch hier nicht nötig. Der Widerstand R_8 sorgt dafür, dass der Gateanschluss in jedem Fall ein Bezugspotential hat. Bei fehlendem Eingangssignal wird das Gate also hochohmig geerdet.

Blau: Ladezustand Da beide Batterien von unabhängigen Batteriemanagementsystemen überwacht werden, können sie auch einen unterschiedlichen Ladezustand aufweisen. Es ist deswegen zweckmäßig, den jeweils tieferen Ladestand anzeigen zu lassen, um damit den pessimistischsten Fall abzudecken. Diese Signale werden vom BMS in Form eines 5 kHz PWM-Signales zur Verfügung gestellt. Die Idee des Herstellers ist, dass dieses Signal direkt auf ein analoges Messgerät eingespielen wird, dessen Massenträgheit das Signal glättet. Da beim Detroit lediglich ein Anzeigegerät zur Verfügung steht, müssen diese Signale bereits vorzeitig verglichen werden.

Aus diesem Grund werden die beiden Signale zuerst durch ein eingangsseitiges Tiefpassfilter geglättet. Die Operationsverstärkerstufe U_{7A} vergleicht anschliessend die beiden Signale und gibt ein Signal 0 oder 1 aus, je nachdem, nach welchem Tiefpass eine höhere Spannung anliegt. Um unnötige Schaltvorgänge bei beinahe gleichen Signalen zu verhindern, ist mit Hilfe der beiden Widerstände R_{19} und R_{20} eine Hysteresis eingebaut.

Der Transistor Q_1 kann mit dem Signal von U_{7A} direkt angesteuert werden. Da jedoch im umgekehrten Fall ebenfalls ein MOSFET verwendet werden soll, muss dieses Signal invertiert werden. Zu diesem Zweck vergleicht der Operationsverstärker U_{7B} dieses Signal mit der halben Versorgungsspannung, wobei das Signal 1 deutlich über dieser liegt, das Signal 0 deutlich darunter. Dieses invertierte Signal wird an das Gate des Transistors Q_2 angelegt.

Es steht nun eine Spannung zur Verfügung, welche dem jeweils tieferen der beiden geglätteten

PWM-Signalen entspricht. Da das verwendete Voltmeter jedoch verhältnismässig niederohmig ist, wird mit dem Operationsverstärker U_{7C} und dem MOSFET Q_9 eine Spannungsfolgerschaltung gebildet. Der Operationsverstärker vergleicht dabei sein Eingangssignal mit der Spannung, welche am Ausgang des Spannungsfolgers anliegt.

Auch bei dieser Schaltung müssen die MOSFETs nur vergleichsweise langsam schalten. Aus diesem Grund wurde für deren Anschluss die selbe Schaltung wie bei den Treiberstufen gewählt. Lediglich beim Spannungsfolger wurde davon abgewichen. Da der Spannungsteiler der beiden Widerstände R_{27} und R_{28} die Spannung nicht verfälschen soll, ist der Gateanschluss über das Voltmeter mit Masse verbunden. Die Idee dahinter ist, dass bei ausgeschaltetem Eingangssignal der Innenwiderstand des Messgerätes im Vergleich zu R_{28} klein ist, also sowieso nicht ins Gewicht fällt. Bei Funktion der Schaltung existiert der Spannungsteiler aber praktisch nicht, da über dem Widerstand lediglich eine sehr kleine Spannung anliegt.

1.0.4. Schaltvorgänge und -zustände

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schaltvorgänge und -zustände des Fahrzeuges analysiert und beschrieben. Dabei wird besonders auf das Zusammenspiel von Mechanisch zu Elektrisch eingegangen.

Parken Im Zustand Parken ist der Detroit durch die Handbremse gesichert. Diese blockiert die Hinterräder und unterbricht gleichzeitig den Hauptstromkreis durch den Cut-Out-Switch. Gleichzeitig zeigt der Ganghebel in der neutralen Position vertikal nach oben, womit der Rear-Reverse-Switch ebenfalls keinen Kontakt macht. Somit ist Hauptstromkreis sogar zweifach unterbrochen.

Parken zu Neutral Im Zustand Neutral ist der Oldtimer nicht mehr durch die Handbremse gesichert. Um diese zu lösen sind zwei Schritte gleichzeitig notwendig. Zum einen soll der Ganghebel in waagerechte Position gebracht werden um ihn dann anschliessend zu sich zu ziehen. Das ist sogleich die Motorbremse, welche die eigentliche Bremsung bei Bedarf unterstützen kann. Damit wird der Sicherungshebel des Cut-Out-Switch betätigt. Somit ist es nun möglich mit dem zweiten Schritt die Handbremse zu betätigen, wodurch sich die Handbremse und sogleich der Cut-Out-Switch aus der Verankerung heben lassen um sich zu lösen und den Hauptstromkreis zu schliessen.

Neutral zu Parken Durch die Betätigung der Handbremse wird eine Feder über Zahnräder gespannt und der Cut-Out-Switch unterbricht den Stromkreis. Zu beachten ist, dass die Handbremse mit voller Kraft durchgedrückt wird, damit der Stromkreis klar unterbrochen ist.

Neutral zu Vorwärts Durch das Stellen des Ganghebels in waagrechte Position wird der Rear-Reverse-Switch in die Position Vorwärts geschaltet. Das Wegdrücken des Ganghebels wird mit einem Einrasten. Dies setzt einen Hebel in Bewegung, welcher bis hin zum Stufenschalter führt. So dreht dieser nun in Position 1 und das Fahrzeug fährt im 1. Gang los. Ist das Anfahren nun geschehen, kann in den 2. Gang geschaltet werden. Dies erfolgt durch weiteres Wegdrücken des Ganghebels, bis dieser wieder einrastet. Höhere Gänge bis zum 5. können mit der selben Methode erreicht werden.

Neutral zu Rückwärts Bei einer 45° -Stellung des Ganghebels verschiebt sich der Rear-Reverse-Switch in Position Rückwärts, womit der Stromfluss, wie der Name des Switch schon sagt, umgekehrt. Durch gewohntes Schalten in den ersten Gang dreht der Stufenschalter wieder in Position 1 und das Fahrzeug lässt sich rückwärts lenken.

2 Schlussfolgerung

3 Literaturverzeichnis

- [1] (06.04.2008) Reihenschlussmotor (interne Verschalung. Wikipedia. Aufgerufen am 18.04.2017. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine#/media/File:Reihenschlussmotor.svg>

A Anhang