Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 16

Artikel: Motorsteuerung für Elektrofahrzeuge mit MOSFET-Leistungselektronik

Autor: Gahleitner, A. / Schauer, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904249

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Motorsteuerung für Elektrofahrzeuge mit MOSFET-Leistungselektronik

A. Gahleitner, G. Schauer

Angepasst an die Anforderungen bei Elektrofahrzeugen wurde eine kostengünstige Leistungselektronik entwickelt, die bei kompakten Abmessungen, einfachem Aufbau und geringem Bauteileaufwand einen hohen Anlaufstrom, einstellbare Strombegrenzung, einen weiten Eingangsspannungsbereich und einen geräuschlosen Fahrbetrieb ermöglicht. Zusätzlich konnten auf der Steuerplatine wichtige Überwachungseinrichtungen vorgesehen werden.

Une électronique de puissance avantageuse a été développée en fonction des exigences posées aux véhicules électriques. Grâce à des dimensions compactes, un montage simple et un nombre restreint de pièces détachées, il est possible d'obtenir un courant de démarrage élevé, une limitation de courant réglable, un vaste secteur de tension d'entrée et une traction électrique silencieuse. Des dispositifs de contrôle importants ont pu en outre être installés sur la platine de commande.

Adresse der Autoren
Prof. Dr. *Alfred Gahleitner* und
Dipl.-Ing. *Gerd Schauer*, Institut für Elektrotechnik, Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Strasse 18, A-8700 Leoben

1. Einführung und Aufgabenstellung

Fahrzeuge mit Elektroantrieb gewinnen zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz der mitgeführten gespeicherten elektrischen Energie muss für den Betrieb minimiert werden, wie der in Figur 1 dargestellte Vergleich der verfügbaren Leistungs- und Energiedichte elektrochemischer Batterien in bezug auf Vergasertreibstoffe zeigt [1]. Damit wird deutlich, dass der Anwendungsschwerpunkt dieser Fahrzeuge im Nahverkehrsbereich liegt [2].

Bei der Entwicklung des Antriebskonzeptes ist auch noch die geforderte Leistungsreserve hinsichtlich Beschleunigung und Steigfähigkeit zu berücksichtigen.

Für das Elektrofahrzeug COLENTA-Club (siehe Kasten) war eine Leistungselektronik zu entwickeln, der folgende Ausgangsdaten zugrunde lagen:

Fahrzeugart	Leichtes Transportfahrzeug in Kunststoffkarosserie
Leergewicht (inkl. Batterie)	ca. 600 kg
Batteriegewicht	ca. 250 kg
Batterienennspannung	48 V (60 V)
Motornennleistung	2×4,7 kW (S2)

2. Rechenmodell und Fahrversuche

Der Fahrwiderstand kann aus nachstehender Gleichung ermittelt werden [3], [4].

$$F = F_R + F_L + F_B + F_S$$
$$= \mu_R \cdot m \cdot g + c_w A \varrho / 2 \cdot v^2$$
$$+ m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin\alpha$$

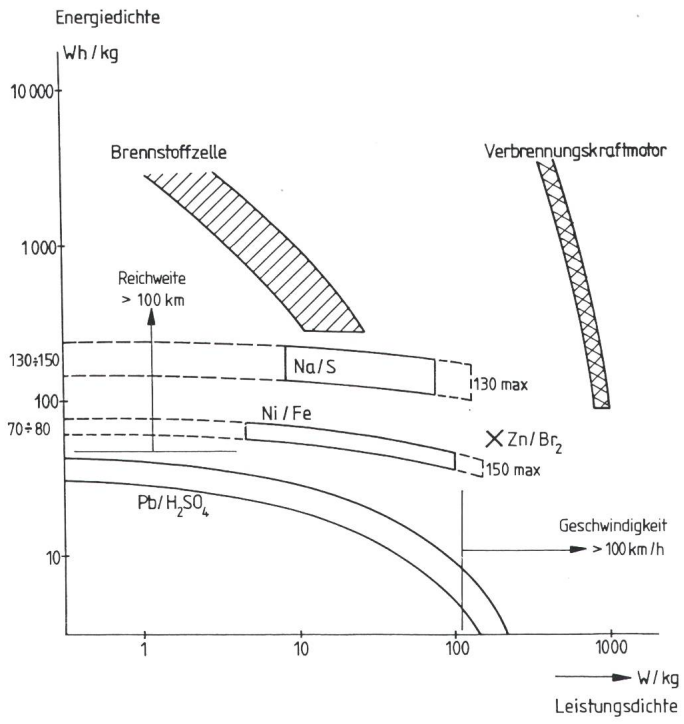


Fig. 1
Leistungs- und Energiedichte verschiedener Energieträger

Colenta CLUB, der am Grand Prix Formel E in Veltheim am 1. Juni 1986 teilgenommen hat

Colenta CARRIER, CLUB und CITY - Elektrofahrzeuge im Baukastensystem

Die Firma Colenta[1], ein Hersteller, der nicht zum Kreis der klassischen Automobilhersteller zählt, hat ein neues Fahrzeugkonzept entwickelt, das zu zwei Basismodellen zahlreiche Aufbauvarianten umfasst.

Das System ist einfach, aber gut durchdacht: Die Karosserie besteht aus zwei tiefgezogenen ABS-Halbschalen, in die ein Zentralrahmen eingesetzt wird. Dieses Chassis bildet das komplette Fahrwerk.

Das Grundmodell gibt es in zwei unterschiedlichen Abmessungen, in 3 m bzw. 2,80 m Länge. Aufgrund der grossen Palette an Aufbauten ist es Colenta möglich, ein breit gefächertes Fahrzeugprogramm anzubieten.

- Der CARRIER, auf Basis des 3-m-Modells, ist als einfacher Pritschenwagen bis hin zum geschlossenen Kleintransporter, der besonders für Einsatzzwecke der Kommunen geeignet ist, lieferbar.
- Der CLUB (Länge 2,80 m) ist für Personen-/Gepäckbeförderung vorgesehen, z.B. für Zubringerdienste auf Flughäfen, aber auch für den Strassenverkehr.
- Als Prototyp besteht ein weiteres neues Modell, der CITY. Er ist für den Stadtverkehr interessant, z.B. als Zweit- bzw. Einkaufswagen im privaten Haushalt.

Einige technische Angaben:
- Gewicht: etwa 500–650 kg, inkl. Batterien, abhängig von der Art des Aufbaus
- Zuladung: etwa 400 kg
- Motorleistung: 6–8 kW
- Höchstgeschwindigkeit: bis etwa 60 km/h
- Reichweite: 50–100 km, je nach Einsatzgebiet
- max. Steigfähigkeit: etwa 20 %
- Wendekreis: etwa 2,80 m
- Batterien: Wartungsfreie oder wartungsarme Traktionsbatterien
- Ladezeit (mit integriertem Ladegerät): 5–10 h an jeder Steckdose 220 V, 10/16 A

[1] COLENTA Elektrofahrzeuge GmbH & Co. KG, Röntgenstrasse 3, D-6054 Rodgau

mit

F_R Rollwiderstand
F_B Beschleunigungswiderstand
F_L Luftwiderstand
F_S Steigungswiderstand

Verschiedene Rechenmodelle wurden aufgestellt und der Einfluss der einzelnen Parameter (Rollwiderstand, c_W-Wert, Steigungsfähigkeit) untersucht. Berücksichtigt wurden dabei auch die Batteriekennlinien, so zum Beispiel der Einfluss der Batteriespannung und der entnehmbaren Energie in Abhängigkeit vom Entladestrom. Durch Messungen an einem Versuchsfahrzeug konnten die Berechnungen verifiziert werden.

In Figur 2 ist als Beispiel die gemessene elektrische Motorleistung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Steigungen aufgetragen.

3. Realisiertes Antriebskonzept

Aufgrund der günstigen Drehzahlkennlinie und der geringeren variablen Batteriebelastung wird Gleichstromreihenschlussmotoren der Vorzug gegeben. Die Drehrichtungsumkehr erfolgt durch Umschalten der Reihenschlusswicklung mit Schützen, die Änderung der Fahrgeschwindigkeit durch Ankerstromstellung (Gleichstromsteller, Chopper).

Da der Antrieb ohne Schaltgetriebe ausgeführt ist, wurde die Untersetzung so gewählt, dass erst bei Steigungen von 5–15 Prozent (je nach Untersetzung) die volle Motornennleistung erreicht wird. Auf ebener Strecke wird der Motor damit im Bereich des höchsten Wirkungsgrades betrieben (Fig. 3).

Als Energiespeicher dienen Bleisäure-Batterien verschiedener Hersteller.

Aus dem bisher Ausgeführten ergeben sich für die Bemessung des Choppers folgende Forderungen:

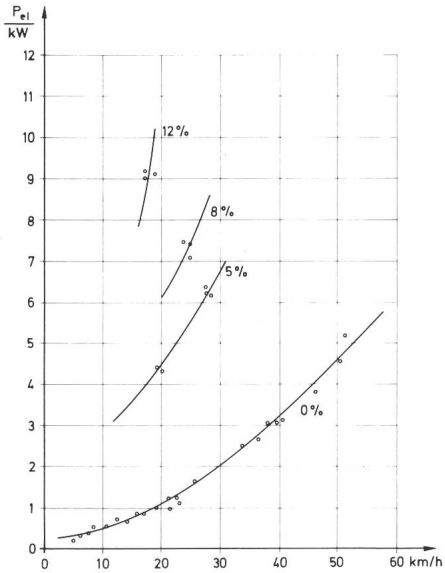


Fig. 2 Elektrische Motorleistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei unterschiedlicher Steigung

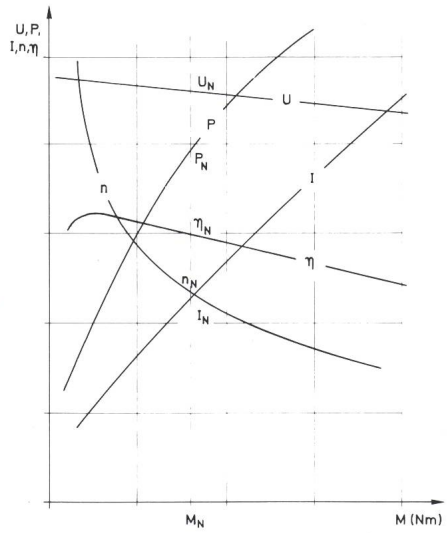


Fig. 3 Kennlinien eines Reihenschlussmotors

Technische Rahmendaten:
Zul. Eingangsspannung
36 ... 48(60)V
Anfahrstrom (I_{max}) ca. 500A
Dauerstrom(I_N) 200 A, 300A (5 min)
Ruhestrom der
Steuerelektronik ≦20mA
- Ansteuerung der Schütze für Vor-/ Rückwärts auf Steuerplatine enthalten
- stromloses Schalten der Schütze
- nur zwei Leitungen zu Fahrgeber

Überwachung auf
- Leitungsbruch zum Fahrgeber
- Tiefentladungsschutz der Batterie
- Übertemperatur
- Kurzschluss der FET

Geräuschloser Betrieb

4. Funktionsbeschreibung

Der Chopper besteht aus zwei Baugruppen, einem Leistungsteil und dem Steuerteil.

Figur 4 zeigt den aufgebauten Chopper. In Bildmitte der Leistungsteil mit den seitlich angebauten Kühlkörpern und dem darüberliegenden Steuerteil. Vorne sind die Anschlussschienen für den Leistungsteil herausgeführt, darüber ist der Anschlussstecker für den Steuerteil ersichtlich.

4.1 Leistungsteil

Der Leistungsteil besteht im wesentlichen aus den Siebkondensatoren (C), den Freilaufdioden (FLD) und den Leistungstransistoren. Als Leistungstransistoren wurden Power MOSFET eingesetzt, die hier gegenüber bipolaren Transistoren folgende Vorzüge aufweisen:
- hohe Schaltfrequenz möglich
- niedriger ON-Widerstand
- einfache Drain-Source-Schutzbeschaltung

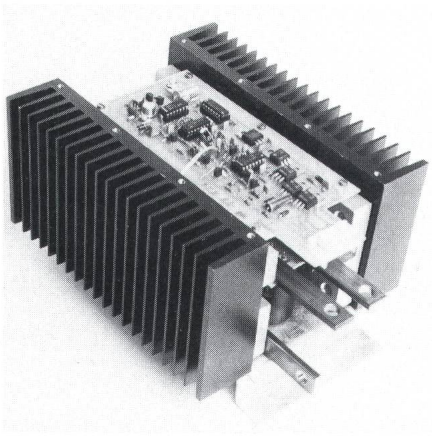
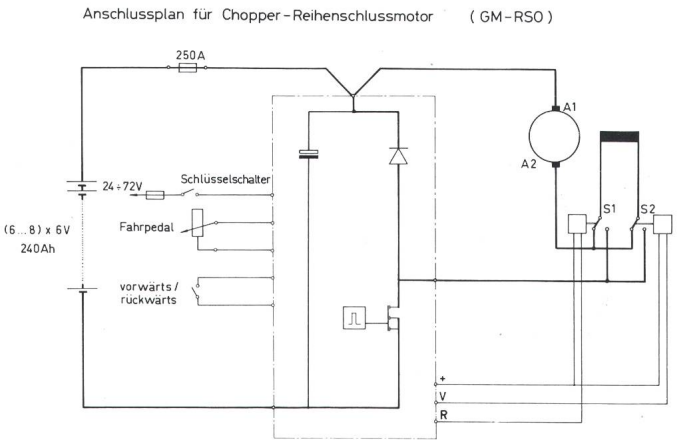


Fig. 4 Ansicht des aufgebauten Choppers

Fig. 5
Anschlussplan



- hohe Impulsbelastbarkeit bis zur vollen Sperrspannung
- kleine Steuerleistung und damit
- einfachere Hilfsstromkreisversorgung.

Figur 5 zeigt den Anschlussplan. Der Siebkondensator (C) ermöglicht eine starke Glättung des Batteriestroms, der dann nur geringe Welligkeit aufweist. So wurde z. B. bei I_B = 100 A eine Stromwelligkeit von 0,5 A_{ss} gemessen. Für die Batterie ergibt sich der Vorteil einer fast reinen Gleichstromentladung statt einer mit höheren Verlusten verbundenen Impulsbelastung.

Die Anordnung des Leistungsteiles wurde extrem induktivitätsarm ausgeführt, ein zusätzlicher Schutz (Klemmschaltung) gegen Schaltüberspannungen ist vorgesehen (Fig. 6a) [5].

So entsteht zum Beispiel beim Abschalten von 500 A in 300 ns an einer Zuleitungsinduktivität von nur 20 nH (L_σ) eine Spannung von

$$u = L_\sigma \frac{di}{dt} = 20 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{500}{300 \cdot 10^{-9}}$$

≈ 33 V

Die geforderte Strombelastbarkeit konnte durch parallel geschaltete Power MOSFET erreicht werden, wobei die gleichmässige Stromaufteilung zwischen den FET von der Gleichmässigkeit der Durchgangswiderstände R_{DSon} und von der Übertragungssteilheit g_{fs} abhängt [6].

Durch Verwendung von FET aus derselben Charge und positiven Temperaturkoeffizienten kann ein thermisch bedingtes Ungleichgewicht zwischen einzelnen FET ebenfalls nicht auftreten, lediglich eine Abminderung der Strombelastbarkeit um etwa 10% wegen der vorhandenen Typensteuerung ist zu berücksichtigen. Die Temperaturabhängigkeit des On-Widerstandes berechnet sich nach folgender Formel:

$$R_{DSon}(T) = R_{DSon25\,°C}(1 + \alpha/100)^{T-25}$$

mit α = 6...9

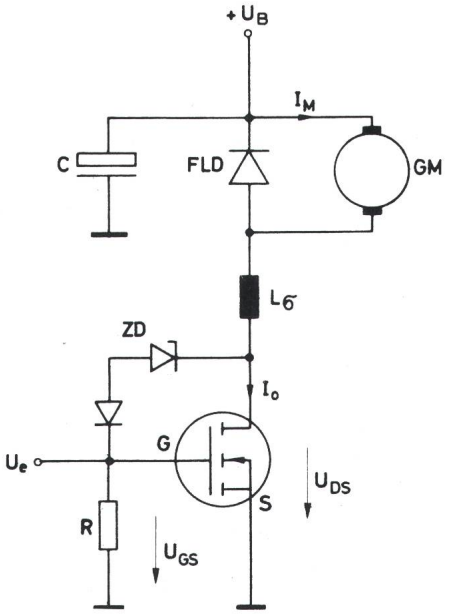


Fig. 6a Schutzbeschaltung für Power MOSFET

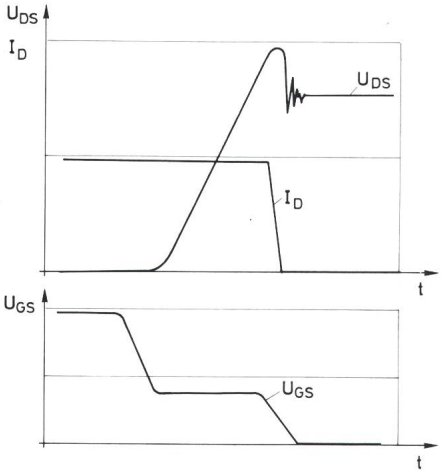


Fig. 6b Strom- Spannungsverlauf am MOSFET beim Ausschalten

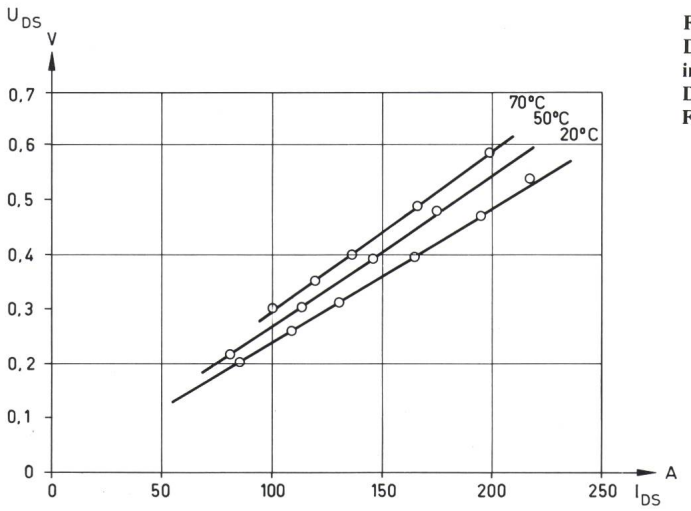


Fig. 7
Drain-Source-Spannung in Abhängigkeit vom Drainstrom und der FET-Temperatur

Im eingeschalteten Zustand verhält sich der FET wie ein niederohmiger Widerstand, der Spannungsabfall U_{DS} in Abhängigkeit vom Drain-Strom I_{DS} ist in Figur 7 angegeben. Die Freilaufdiode weist eine geringe Sperrverzugszeit auf. Sie ist besonders überlegt plaziert.

4.2 Steuerteil

Der Steuerteil hat drei Aufgaben zu erfüllen: Steuern, Regeln und Überwachen. Figur 8 zeigt das vereinfachte Blockschaltbild. Der Spannungssollwert wird durch den Fahrgeber vorgegeben und steuert den Pulsbreitenmodulator an. Ein maximaler Motorstrom (über einen Trimmer einstellbar) kann in Verbindung mit einer Ist-Stromerfassung nicht überschritten werden. Über eine Treiberstufe werden dann die Power MOSFET angesteuert.

Grosse Aufmerksamkeit wurde der Überwachung gewidmet. Die Schütze sind so beschaltet, dass bei abgeschalteter Steuerelektronik der Motorkreis unterbrochen ist. Sollten durch einen Fehlerfall beide Schütze einschalten, bleibt der Ankerstromkreis ebenfalls unterbrochen. Nur wenn einer der beiden Schütze schaltet, wird der Ankerstromkreis geschlossen, und es erfolgt die Stromfreigabe.

Vor Einschalten der Schütze wird der Leistungsteil auf eventuellen Kurzschluss in den FET überprüft. Bei Leitungsbruch zum Fahrgeber werden die FET gesperrt.

Ausserdem wird bei Erreichen der zulässigen Temperatur im Chopper bzw. Motor die Ausgangsleistung zurückgeregelt. Als notwendig erwiesen hat sich auch ein Tiefentladungsschutz. Bei Unterschreiten einer einstellbaren, minimal noch zulässigen Spannung wird der Ankerstrom zurückgeregelt.

Weiter wird durch die Elektronik bewirkt, dass das Umschalten der Schütze von «Vorwärts» auf «Rückwärts» und vice versa leistungslos erfolgt, was sich günstig auf die Lebensdauer der Schütze auswirkt.

5. Zusammenfassung

Der entwickelte Chopper weist bei kompakten Abmessungen eine hohe Strombelastbarkeit, einen geräuschlosen Betrieb, einen weiten Eingangsspannungsbereich und umfangreiche Überwachungseinrichtungen auf. Der zulässige hohe Anfahrstrom gestattet zügiges Beschleunigen und sicheres Anfahren auch bei Steigungen. Dieser Chopper wurde nach eingehenden Geländetests auch beim 1. Grand Prix der Formel E in Veltheim/Schweiz am 1. Juni 1986 zufriedenstellend eingesetzt.

Der grosszügig dimensionierte Leistungsteil gestattet auch den Einsatz des Choppers unter hohen Umgebungstemperaturen, wie sie in tropischen Ländern auftreten. Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und Termiten wird durch den vollständig geschlossenen Aufbau erreicht.

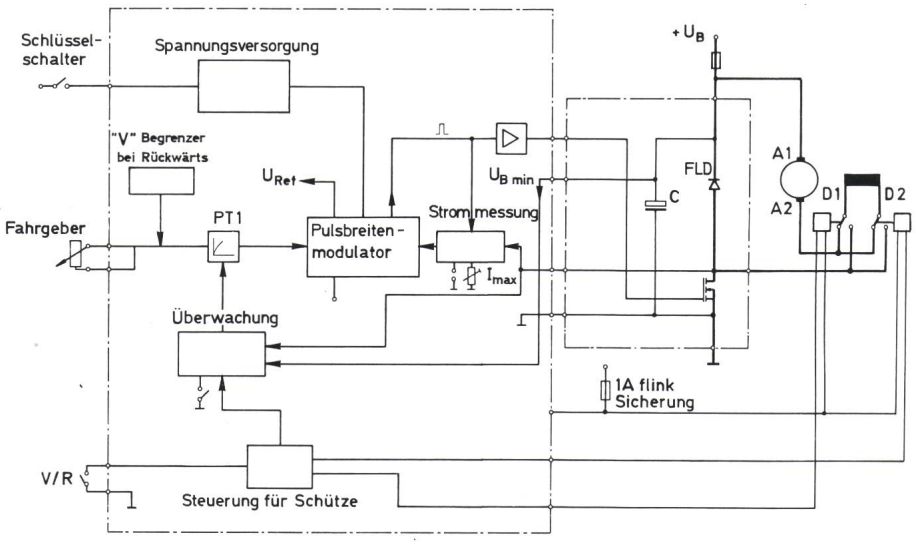


Fig. 8 Vereinfachtes Blockschaltbild des Steuerteiles

Literatur

[1] *A. Gahleitner:* Entwicklungsstand bei elektrisch betriebenen schienenlosen Fahrzeugen. Vortragsmanuskript der Tagung: Umweltschutz als ökologische, technische und wirtschaftliche Herausforderung. 18.–20. September 1985, Eisenerz.

[2] *U. Görlach:* Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Reichweite von Elektrofahrzeugen. ETZ-A, Bd. 94 (1973), H. 11, S. 632...636.

[3] *A. Walz:* Beitrag zur Theorie des Elektromobils. ETZ-A, Bd. 94 (1973), H. 11, S. 622...631.

[4] *A. Cupsa* und *U. Görlach:* Grundlagen zur Vorausberechnung von Elektro-Strassenfahrzeugen. ETZ-A, Bd. 98 (1977), H. 6, S. 403...407.

[5] *J.-P. Stengl* und *J. Tihanyi:* Leistungs-MOSFET Praxis. München, Pflaum Verlag (1985).

[6] *B. Hall:* Leistungs-MOSFET erfolgreich parallelschalten. Siemens Comp. 23 (1985), H. 2, S. 72...76.