

**Eisenbahnfreunde Kraichgau e.V.**

# **Technische Planunterlagen**

## **Booster**

## Technische Planunterlagen

### Booster

erste Ausgabe: 2013-08

Herausgegeben von:

Eisenbahnfreunde Kraichgau e.V.  
- Modellbahnreferat -

Bearbeitet von:

Stefan Schneider  
Martin Baumann

Anschrift:

Postfach 1265  
74872 Sinsheim

Ruf:

Tel.: (07261) 5809  
Fax: (07261) 9111190

Internet:

[www.eisenbahnfreunde-kraichgau.de](http://www.eisenbahnfreunde-kraichgau.de)  
[info@eisenbahnfreunde-kraichgau.de](mailto:info@eisenbahnfreunde-kraichgau.de)

## Vorwort

Auf der Modellbahn-Anlage wird der Fahrbetrieb von *analog* auf *digital* umgestellt. Der bisher eingesetzte Fahrregler muss durch einen Booster ersetzt werden.

Durch die Verwendung der Begriffe *analog* und *digital* ist die Bedeutung im modellbahnerischem Sinne gemeint. Unter analog wird auch das elektronisch erzeugte Rechtecksignal des Fahrreglers verstanden.

Rechtlicher Hinweis:

Der Inhalt dieses Dokumentes ist geistiges Eigentum der Eisenbahnfreunde Kraichgau e. V. und deren Autoren. Die Verwendung und Nachbau des Boosters ist nur für private oder vereinseigene Zwecke gestattet. Eine kommerzielle Verwendung ist nicht erlaubt.

## Inhaltsverzeichnis

1	Umstellung auf <i>Modellbahn Digital</i>	4
2	Aufbau und Funktionsweise des Boosters	6
3	Schaltung des Boosters	7
3.1	Leistungsteil	7
3.2	Streckenschutz	10
3.3	Schutz- und Kontrolleinrichtung	11
4	Ausblick	12
5	Anhang	13
5.1	Material- und Bauteilliste	13
5.2	Steckleistenbelegung	14
5.3	Bestückungsplan auf der Bauteilseite der Platine	15
5.4	Platinenlayout	15
5.5	Ansicht einer bestückten Fahrregler-Platine	16
5.6	Dimensionierung der Schaltung	17
5.7	Auswertung, Datenaustausch und Software	22
5.8	Diagramme (Auszug)	23
5.9	Literaturverzeichnis	24

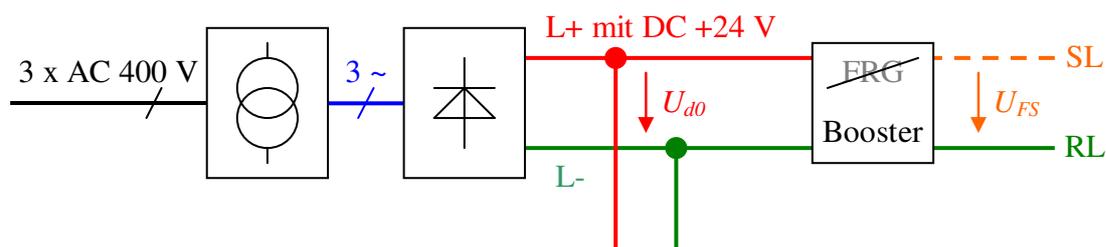
## 1 Umstellung auf Modellbahn Digital

Um größere Betriebspausen zu vermeiden, wird die Umstellung des Fahrbetriebes von *analog* auf *digital* in drei Schritten durchgeführt. Dabei wird nicht nur die Fahrstromversorgung grundlegend geändert, es erfolgt auch eine Anpassung der Leit- und Sicherungstechnik.

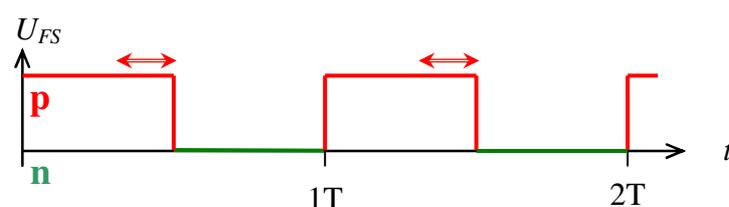
*Modellbahn Digital* ist zwischenzeitlich Stand der Technik. Da mittlerweile fast alle Triebfahrzeuge von den Herstellern mit einem Digital-Decoder ausgerüstet werden, ist ein Modellbahnbetrieb mit der bisherigen Fahrstromversorgung problematisch und kann sogar zum Defekt des Digital-Decoders führen.

### 1. Schritt:

Der Booster ersetzt den Fahrregler und muss zunächst die gleiche Spannungsform generieren wie seither der Fahrregler. Es ist eine unipolare positive Rechteckspannung mit einem variablen Puls-/Pausenverhältnis und einer Aussteuerung von bis zu 50% einschließlich der Anfahr- und Bremsvorgänge. Die Fahrstromversorgung bleibt in dieser Phase unverändert und die Betriebsart des Boosters ist analog! Bild 1 zeigt den bisher prinzipiellen Aufbau der Fahrstromversorgung mit einem Stromrichtertransformator und anschließender Sechspuls-Brückenschaltung. In Bild 2 ist der zeitliche Verlauf der Fahrspannung dargestellt.



**Bild 1:** Schema der unipolaren Fahrstromversorgung im analogen Modellbahnbetrieb

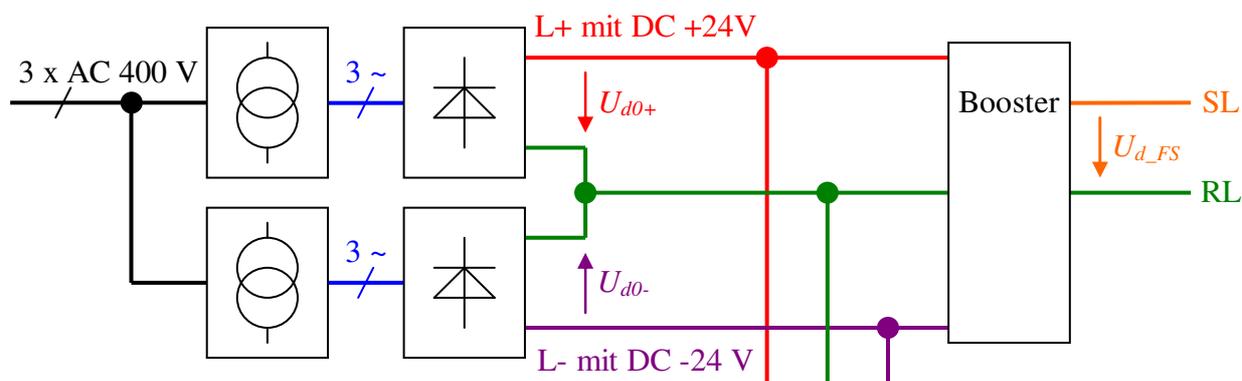


**Bild 2:** unipolare Fahrspannung im analogen Modellbahnbetrieb bei voller Aussteuerung

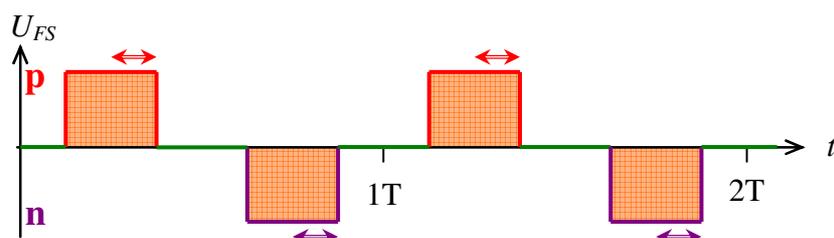
Beim Booster wird nur der positive Leistungsteil verwendet. Die Leistungsabgabe ist gegenüber dem Fahrregler höher und besitzt ein verbessertes Verhalten bei Überlast sowie eine automatische Abschaltung der Fahrstromversorgung im Kurzschluss-Fall.

## 2. Schritt:

Durch einen zweiten Stromrichtertransformator ist die Fahrstromversorgung bipolar aufgebaut mit der negativen Phase L- wie in Bild 3 gezeigt! Es wird jetzt auch der negative Leistungsteil des Boosters verwendet. Er generiert eine Rechteck-Wechselspannung mit maximal je 25% Aussteuerung (Bild 4). Der Modellbahnbetrieb wird weiterhin *analog* durchgeführt. Des Weiteren muss die gesamte Gleisinfrastruktur der Modellbahnanlage auf Gleisfreimelder umgerüstet sein.



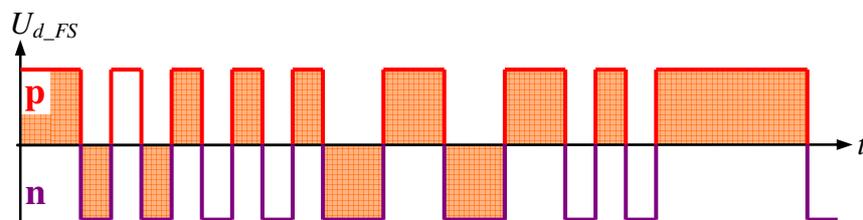
**Bild 3:** Schema der bipolaren Fahrstromversorgung im analogen und digitalen Modellbahnbetrieb



**Bild 4:** bipolare Fahrspannung im analogen Modellbahnbetrieb bei voller Aussteuerung

## 3. Schritt:

Es wird auf *Modellbahn Digital* umgestellt. Die bipolare Fahrstromversorgung zum Booster bleibt unverändert. Am Ausgang des Boosters liegt die Fahrspannung jetzt dauerhaft an. Die Datenpakete des Steuersignals, die von der Digital-Zentrale kommen, werden im Booster in die Fahrstromversorgung eingetaktet. Bild 5 zeigt den prinzipiellen Verlauf der nun digitalisierten Fahrspannung  $U_{d\_FS}$  am Ausgang des Boosters.



**Bild 5:** Fahrspannung am Ausgang des Boosters bei Modellbahn Digital

## 2 Aufbau und Funktionsweise des Boosters

Der Booster ist ein »elektronischer Leistungs- und Datenschalter«. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt bipolar mit DC +24 V als L+ und DC – 24 V als L- jeweils gegen die Rückleitung (RL) als Bezugspotenzial. Dabei wird im Booster die bipolare Gleichspannung in eine Rechteck-Wechselspannung umgerichtet (Bild 3). Der Polaritätswechsel ist mit der zeitlichen Abfolge des Digitalsignals von der Digitalzentrale identisch, d. h. die Datenpakete des Steuersignals werden in die Fahrstromversorgung eingetaktet (Bild 5). Es können folgende Formate verwendet werden:

- Digital Command Control (DCC) nach [1] und [2]
- Märklin Motorola (MM) nach [3]
- SelecTRIX (SX) nach [4] und [5]

Daraus generiert die digitalisierte Fahrspannung  $U_{d\_FS}$ .

Eine weitere wichtige Funktion ist die Begrenzung des Fahrstromes bei Überlast sowie die automatische Abschaltung der Fahrstromversorgung bei Kurzschluss. Der Booster versorgt einen festgelegten Fahrstrombezirk, der mit logischen Gleisabschnitten, wie Bahnsteiggleis, Vorfeldverlängerung, Streckenblock, Abstellgruppe oder Nebenanlagen identisch ist.

Der Booster teilt sich in drei Schaltungsbereiche auf:

### 1. Leistungsteil:

Es wird die digitalisierte Fahrspannung  $U_{d\_FS}$  bereitgestellt. Im Leistungsteil werden die Traktionsenergie für die Fahrmotoren und die Daten für den Decoder miteinander verknüpft. Eine Rückmeldung vom Decoder des Fahrzeuges über den Booster zur Digital-Zentrale ist nicht vorgesehen (s. Kap. 3.1).

### 2. Erfassung Streckenschutz:

In diesem Bereich sind die Grenzwerte der digitalisierten Fahrspannung für Überlast und Kurzschluss festgelegt. Bei Unterschreitung der Grenzwerte erfolgt eine Meldung an die Kontrolleinrichtung (s. Kap.3.2)

### 3. Schutz- und Kontrolleinrichtung:

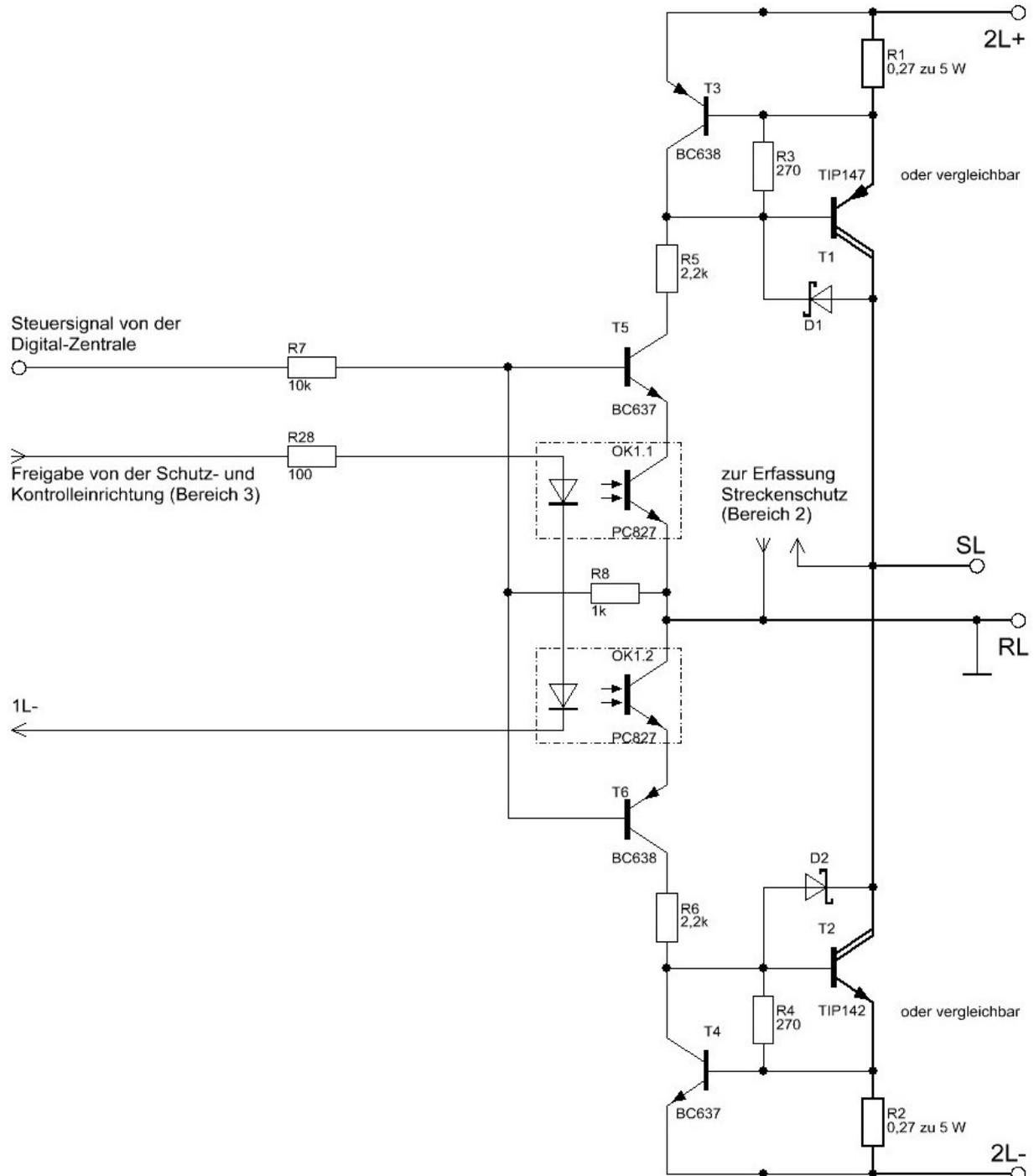
Hier werden die Meldungen vom Streckenschutz ausgewertet und verarbeitet. Des Weiteren erfolgt die Freigabe von der Kontrolleinrichtung an den Leistungsteil und der Datenaustausch über eine RS485-Schnittstelle mit dem Leitrechner (s. Kap. 3.3).

### 3 Schaltung des Boosters

Es werden die Schaltungen der Bereiche im Einzelnen beschrieben.

#### 3.1 Leistungsteil

In Bild 6 ist das Prinzip eines Verstärkers als Gegentakt-Schaltung dargestellt. Zusätzlich zur direkten Ansteuerung des Verstärkers durch die Digital-Zentrale sind eine Strombegrenzung und eine Freigabe durch die Kontrolleinrichtung dargestellt.



**Bild 6:** Leistungsteil (Bereich 1)

## Darlington-Transistoren:

Der Leistungsteil besteht aus einer komplementär aufgebauten Transistorstufe mit  $T1$  und  $T2$  vom Typ *Darlington*. Beim Booster handelt es sich im Prinzip um eine Gegentakt-Schaltung wie sie beim HiFi-Verstärker üblich ist. Im Unterschied hierzu wird nicht geregelt, sondern »hart« geschaltet, ... sehr »hart«! Besondere Eigenschaft dieser Transistoren ist der hohe Verstärkungsfaktor. Typische Werte für  $B$  ( $h_{FE}$ ) liegen weit über 1000.  $T1$  befindet sich als PNP-Typ im positiven Teil und  $T2$  als NPN-Typ im negativen Teil der Schaltstufe. Bild 7 zeigt den inneren Schaltungsaufbau beider Transistortypen. Zu beachten ist, dass durch die Doppel-Verstärkerstufe die Basis-Emitter-Spannung sich auf etwa 1,4 V verdoppelt.

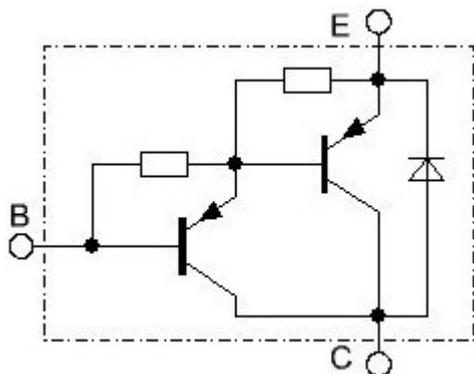


Bild 7a: PNP-Variante

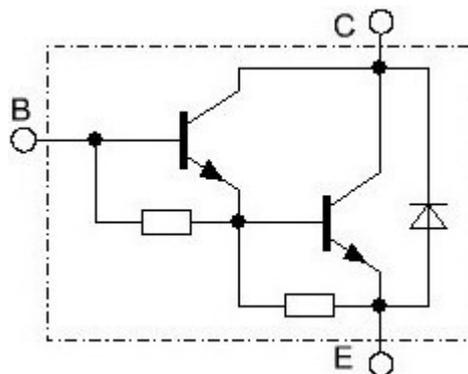


Bild 7b: NPN-Variante

Des Weiteren ist eine Freilaufdiode zum Schutz gegen Überspannung durch die Schaltvorgänge der Kollektor-Emitter-Strecke im Transistorgehäuse integriert, sowie Basis-Emitter-Widerstände zur Verbesserung des Schaltverhaltens.

## Schottky-Dioden:

Parallel zu den Basis-Kollektor-Strecken der Darlingtontransistoren werden je eine Schottky-Diode geschaltet. Diese verhindern weitgehend, dass nicht gleichzeitig beide Kollektor-Emitter-Strecken während des Polaritätswechsels niederohmig – also durchgeschaltet – sind. Durch das »harte« Schalten müssen die Schaltzeiten der verhältnismäßig langsamen Darlington-Transistoren zwingend verkürzt werden. Durch die Schottky-Diode erhält die Basis nur den für die Verstärkung erforderlichen Basisstrom, d. h. der Leistungstransistor arbeitet auf der Sättigungskurve und man muss keine überschüssige Ladungsmengen aus der Basis »ausräumen«, die für das träge Schaltverhalten der Darlington-Transistoren verantwortlich sind.

## Kleinsignaltransistoren:

Es werden zwei BC638 vom PNP-Typ und zwei BC637 vom NPN-Typ verwendet. Die zulässige Kollektor-Emitter-Sperrspannung, ist höher als die Potenzialdifferenz von 48 V zwischen den beiden Phasen L+ und L- der bipolaren Fahrstromversorgung.

Die Basisvorwiderstände  $R5$  und  $R6$  der Darlingtontransistoren sind zugleich die Kollektorwiderstände der Ansteuertransistoren  $T5$  als BC637 und  $T6$  als BC638 und haben einen Widerstandswert von je  $2,2\text{ k}\Omega$ . Die Kollektorströme der Ansteuertransistoren betragen etwa  $10\text{ mA}$ . Dabei ist:

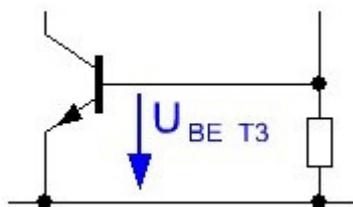
$$I_{R5} = I_{R3} + I_{B_{T1}} + I_{D1}$$

Die einzelnen Ströme werden im Kap. 5.6 berechnet. Die Bestimmung der Widerstandswerte erfolgte empirisch.

Strombegrenzung:

Für die Strombegrenzung wird in den Emitterkreis des Darlington-Transistors ein Drahtwiderstand mit einer zulässigen Verlustleistung von  $5\text{ W}$  geschaltet. Im Parallelpfad befindet sich die Basis-Emitter-Strecke von  $T3$ . Bei Erreichen der Schleusenspannung wird die  $U_{CE}$ -Strecke des Transistors niederohmiger und entzieht dem Darlingtontransistor für die angeforderte Last den notwendigen Basisstrom. Es stellt sich ein stabiler Arbeitspunkt ein, bei dem der Fahrstrom auf einen maximalen Wert konstant gehalten wird.

$$U_{BE_{T3}} = U_{R3}$$



**Bild 8:** einfache Strombegrenzung

Die Auslegung ist in Kap. 5.6 dargestellt. Durch den Temperaturanstieg erhöht sich auch der Widerstandswert des Drahtwiderstandes. Folglich sinkt der Wert für die maximale Stromaufnahme und wirkt zusätzlich einer Gefährdung der Bauteile durch Überbeanspruchung und möglicher Zerstörung entgegen.

Freigabe:

Die Basis der Leistungstransistoren wird über eine UND-Verknüpfung angesteuert:

- $T5$  und  $T6$  als Schalttransistoren des Steuersignal von der Digital-Zentrale
- $U_{CE}$ -Strecke der Optokoppler als Schalter für die Freigabe vom Mikrocontoller

Optokoppler:

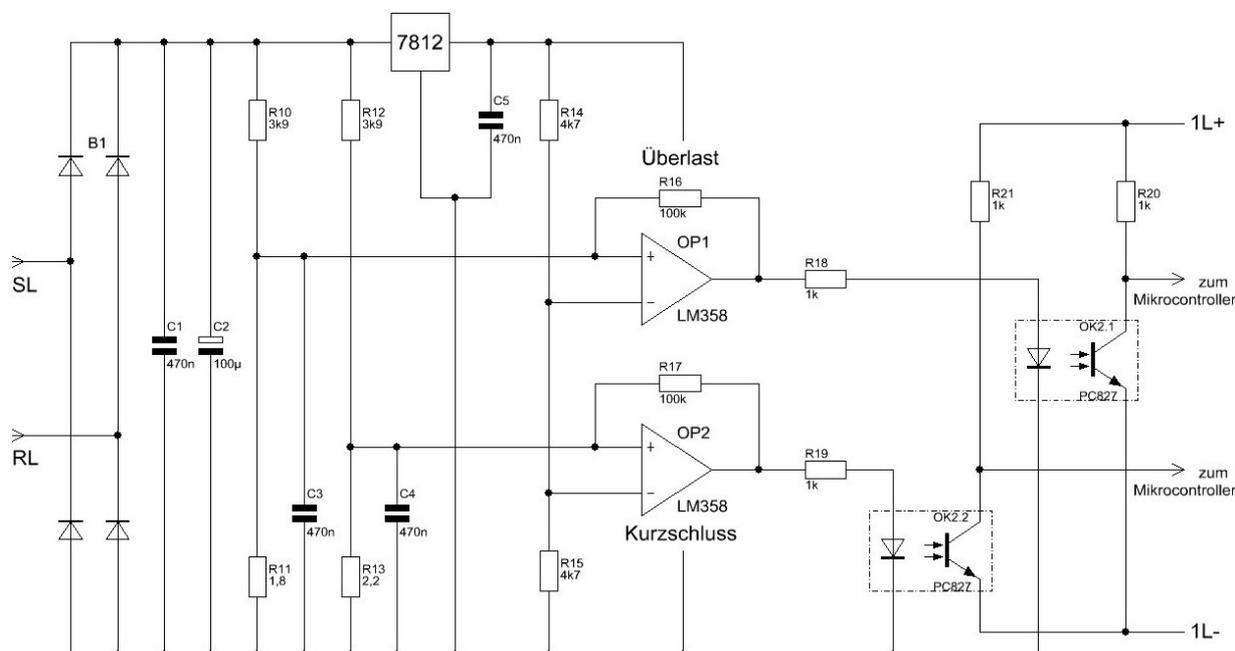
Die Optokoppler OK1 und OK2 dienen zur galvanischen Trennung zwischen der Fahrstromversorgung und der Stromversorgung der Kontrolleinrichtung. Zum einen erfolgt die Freigabe an die Leistungstransistoren durch den Mikrocontroller über OK1 und zum anderen erhält der Mikrocontroller Meldungen zu Überlast und Kurzschluss über OK2 vom Streckenschutz nach Kap. 3.2.

### 3.2 Streckenschutz

Die Schaltung des Streckenschutzes besitzt zwei Funktionen. Dies ist die Erfassung und die Weitermeldung von:

- Überlast
- Kurzschluss

Die Belastung des Boosters wird mit Hilfe des Istwertes der Fahrspannung überwacht. Sie sinkt mit zunehmender Belastung. Beim Erreichen der jeweiligen Schaltschwelle für Überlast oder Kurzschluss kippt der jeweilige Ausgang des Operationsverstärkers (OP) vom H- in den L-Zustand. Das Signal wird über einen Optokoppler (OK2) an den Mikrocontroller weitergeleitet. Die Schaltung ist in Bild 9 dargestellt. Die Widerstandswerte  $R10$  bis  $R13$  müssen in Abhängigkeit des Nennwertes der Fahrspannung und der gewünschten Schwellwerte ausgesucht sein.



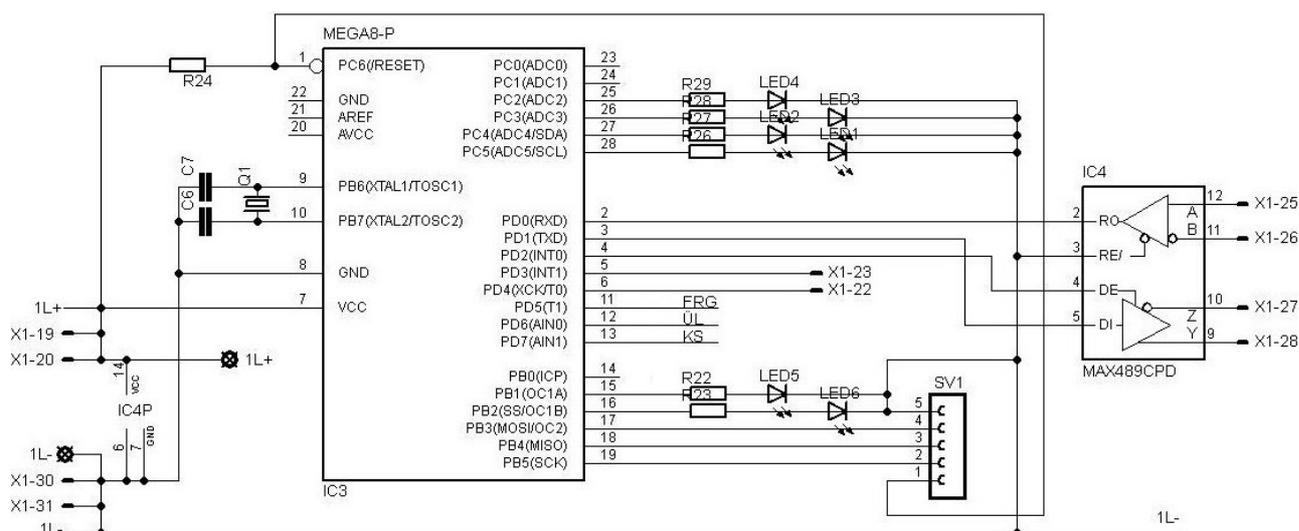
**Bild 9:** Schaltung zur Erfassung des Streckenschutzes

Die Fahrspannung wird über einen Gleichrichter geführt und mit  $C1$  entstört und  $C2$  stabilisiert. Ein Vorteil der Gleichrichtung ist der daraus verhältnismäßig geringe Schaltungsaufwand. Mit einem Spannungsregler wird für die OP's und deren Referenzeingänge eine Konstantspannung von 12 V generiert. Beide OP's sind als Komparatoren beschaltet.

Zusätzlich werden Mitkopplungswiderstände ( $R16$ ,  $R17$ ) eingefügt, um ein höherfrequentes Flattern der OP's an der Schaltschwelle möglichst zu vermeiden. Die Schalthysterese wird aber sehr schmal gehalten, damit die Schaltschwellen nicht zu weit auseinander driften. Streng genommen handelt es sich um einen Schmitt-Trigger. *Flicker*, *Wischer* und *Rauschen* dürfen erfasst und an den Mikrocontroller weitergeleitet werden. Solche Rückwirkungen werden hauptsächlich von Triebfahrzeugen erzeugt. Eine Auswertung erfolgt dann mittels einer Software im Mikrocontroller. Die Ermittlung der Schaltschwellen ist in Kapitel 5.6 dargestellt.

### 3.3 Schutz- und Kontrolleinrichtung

Die Schutz- und Kontrolleinrichtung besteht im Wesentlichen aus einem Mikrocontroller. Er hat die Aufgabe, Meldungen zu Überlast und Kurzschluss vom Streckenschutz qualifiziert auszuwerten und weiterzuleiten. Wichtigste Funktion ist die Abschaltung des Boosters im Kurzschlussfall. Über Freigabe erfolgt die Ansteuerung an die Leistungstransistoren. Des Weiteren werden der notwendige Datenaustausch und die Kommandos mit dem Rechner für die Leit- und Sicherungstechnik über eine RS485-Schnittstelle abgewickelt. Zusätzlich gibt es noch eine Programmierschnittstelle.



**Bild 10:** Schaltung der Schutz- und Kontrolleinrichtung

Diese Einrichtung ist in etwa vergleichbar mit einem Schutzgerät eines Leistungsschalters wie er in Umspann- bzw. Schaltanlagen, Bahn-Unterwerken oder Kraftwerken Anwendung findet.



## 4 Ausblick

Der Booster hat seine Funktionstests erfolgreich absolviert. Im Betrieb werden sich noch einige Verbesserungsmöglichkeiten ergeben. Aufgrund des schaltungstechnischen Mehraufwandes und des zusätzlichen Platzbedarfs wurde auf eine temperaturkompensierte Strombegrenzung verzichtet. Auch eine Fehlererfassung in Abhängigkeit der Polarität der Fahrspannung wurde aus gleichem Grund verzichtet. Die Software ist derzeit noch in Bearbeitung. Die Hauptfunktion zur Auswertung der Überlast- und Kurzschlussmeldung funktionieren bereits in vollem Umfang. Eine höhere Strombegrenzung sollte aufgrund des knapp bemessenen Aufsteckkühlkörpers nicht vorgenommen werden.

## 5 Anhang

### 5.1 Material- und Bauteilliste Booster

- 1 x Epoxydharzplatine 160 mm x 100 mm
  - 1 x 31-polige Stiftleiste nach DIN 41617
  - 1 x Frontplatte mit 3 HE und 6TE einschließlich Griff zur Montage an die Platine
  - 2 x Aufsteckkühlkörper mit 9,9 K/W
  - 6 x Lötösen für Messzwecke
  - 1 x Leistungstransistor TIP147 als T1 oder vergleichbar
  - 1 x Leistungstransistor TIP142 als T2 oder vergleichbar
  - 2 x Signaltransistor BC637 als T3/T6
  - 2 x Signaltransistor BC638 als T4/T5
  - 1 x Spannungsregler 7812 als IC1
  - 1 x Operationsverstärker LM358 (2-fach) als IC2 zuzüglich IC-Fassung
  - 1 x Mikrocontroller MEGA8-P als IC3 zuzüglich IC-Fassung
  - 1 x MAX489CPD als IC4 zuzüglich IC-Fassung
  - 2 x Optokoppler PC827 als OK1 und OK2 zuzüglich IC-Fassung
  - 2 x Schottky-Diode Typ BAT 41 (0,1 A; 100 V)
  - 1 x Quarzoszillator 11,0592 MHz
  - 1 x Brückengleichrichter Typ B80 C1500
  - 6 x Leuchtdioden
  - 4 x 470 Sibatitkondensator als C1, C3, C4 und C5
  - 1 x 100  $\mu$ F Elektrolytkondensator als C2
  - 2 x Drahtwiderstand 0,27  $\Omega$  mit  $P_v = 5W$  als R1 und R2
- Kohleschichtwiderstände:
- 1 x 100  $\Omega$  als R28
  - 2 x 470  $\Omega$  als R3 und R4
  - 5 x 1 k $\Omega$  als R8, R18, R19, R20 und R21
  - 1 x 1,8 k $\Omega$  als R11
  - 2 x 2,2 k $\Omega$  als R5 und R6
  - 1 x 2,7 k $\Omega$  als R13
  - 2 x 3,9 k $\Omega$  als R10 und R12
  - 2 x 4,7 k $\Omega$  als R14 und R15
  - 1 x 10 k $\Omega$  als R7
  - 2 x 100 k $\Omega$  als R16 und R17

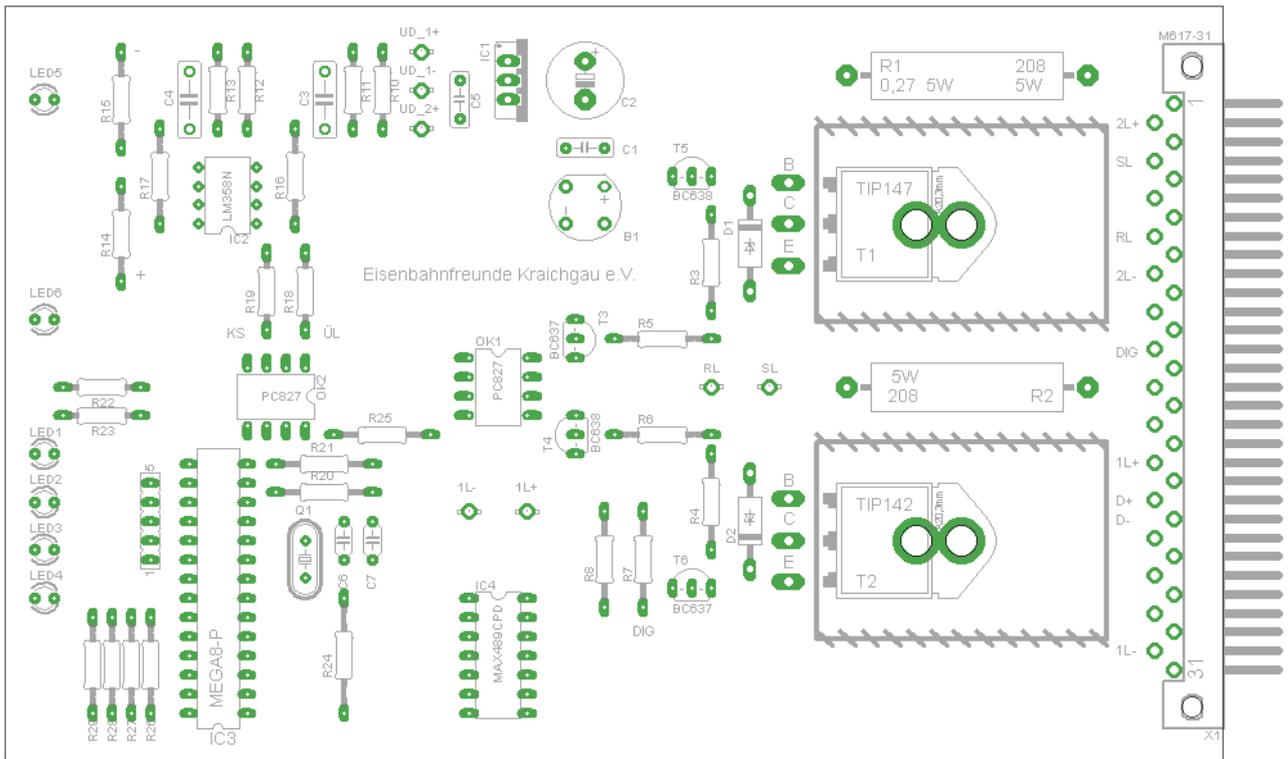
## 5.2 Steckleistenbelegung Booster

31polige Stift- und Buchsenleiste nach DIN 41617

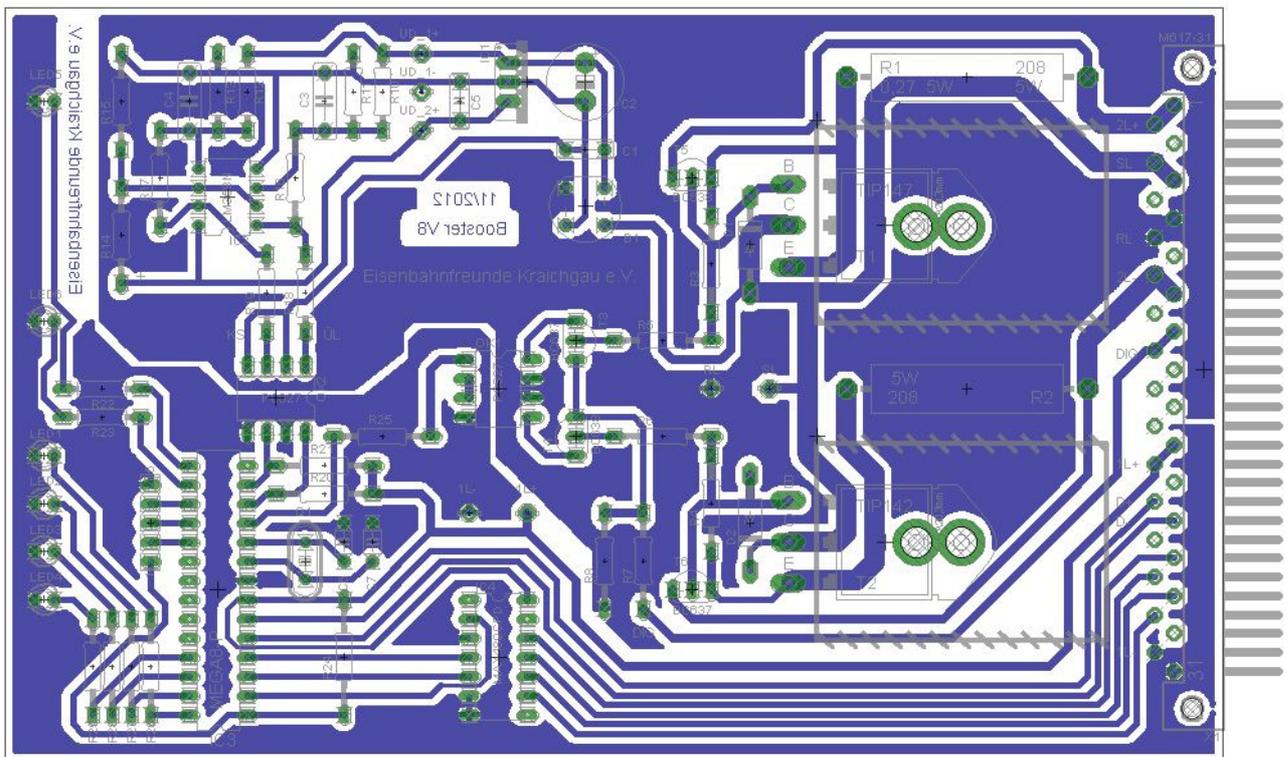
Platinenseite	PIN-Nummer	Verdrahtungsseite
R1	01 ▼	2L+
R1	02 ▲	
	03	
Kollektor T1/T2	04 ▼	SL
Kollektor T1/T2	05 ▲	
	06	
Rückleitung	07 ▼	RL
Rückleitung	08 ▲	
	09	
R2	10 ▼	2L-
R2	11 ▲	
	12	
Ansteuerung	13 ▼	DIG (von der Digitalzentrale)
Ansteuerung	14 ▲	
	15	
	16	
	17	
	18	
Stromversorgung	19 ▼	1L+
Stromversorgung	20 ▲	
	21	
Mikrocontroller	22	D+ (+ von der Digitalzentrale)
Mikrocontroller	23	D- (- von der Digitalzentrale)
	24	
Mikrocontroller/MAX	25	RS485 (Daten A)
Mikrocontroller/MAX	26	RS485 (Daten B)
Mikrocontroller/MAX	27	RS485 (Daten Z)
Mikrocontroller/MAX	28	RS485 (Daten Y)
	29	
Stromversorgung	30 ▼	
Stromversorgung	31 ▲	1L-

- ▼ die zueinander zeigenden Dreieckspitzen kennzeichnen die elektrische  
 ▲ Durchverbindung zweier Pin`s

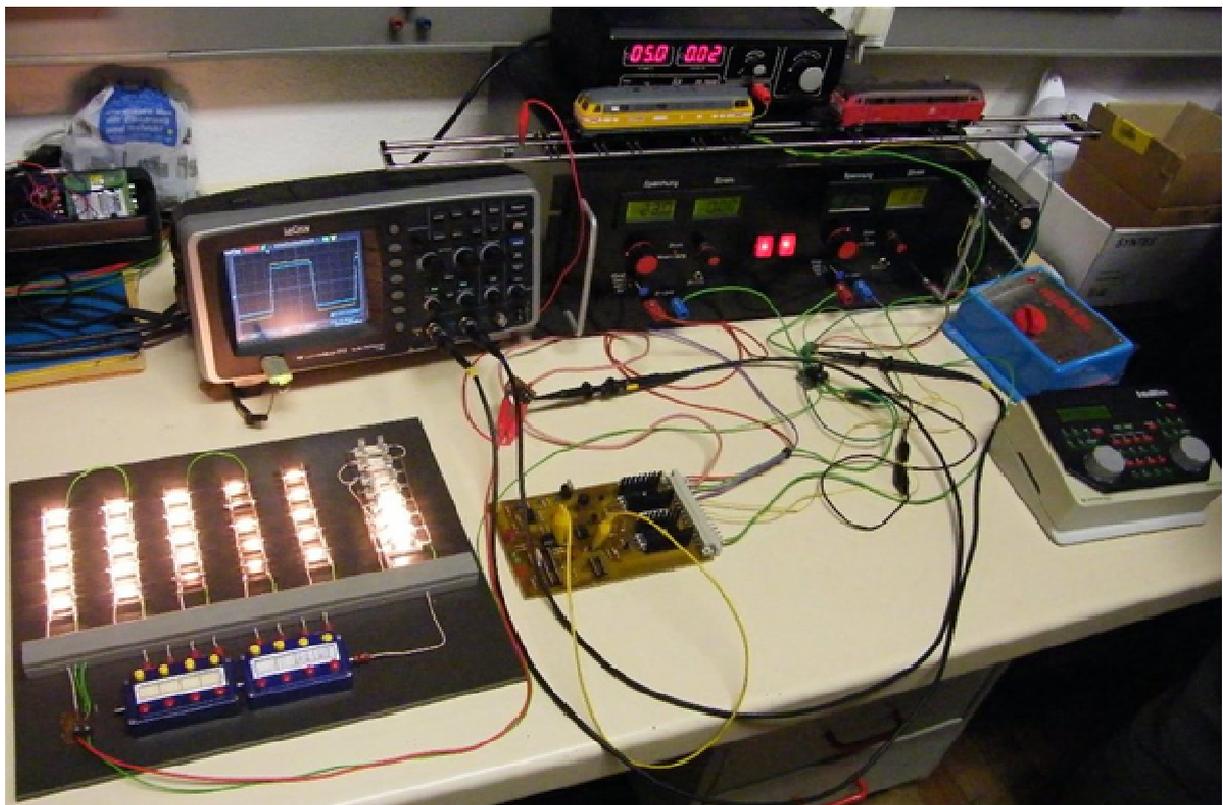
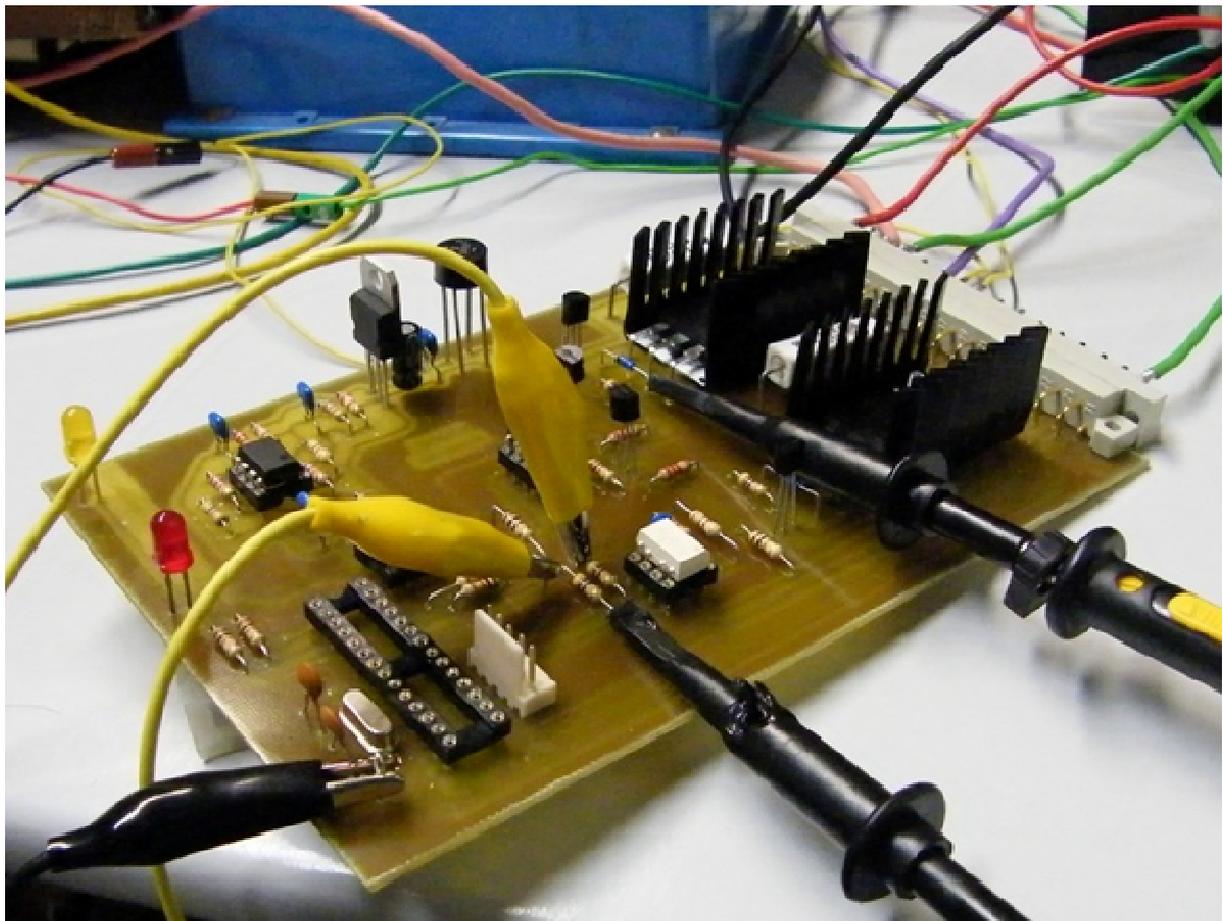
### 5.3 Bestückungsplan auf der Bauteilseite der Platine



### 5.4 Platinenlayout



### 5.5 Ansicht einer bestückten Booster-Platine



## 5.6 Dimensionierung der Schaltung

Es werden die Parameter der Bauteile bestimmt. Der Leistungsteil des Boosters ist komplementär aufgebaut. Es erfolgt daher die Betrachtung für die positive Seite.

### Begrenzung des Fahrstroms

Der maximale Fahrstrom wird mit einem Wert von 2,0 A festgelegt. Dies wird über den Begrenzungswiderstand  $R_I$  und der dazu parallel geschalteten Basis-Emitter-Strecke des  $T_3$  als BC638 realisiert. Mit 0,7 V als angenommene Schleusenspannung genügt für den Regelkreis zunächst die allgemeine Bedingung:

$$U_{R1\_max} = U_{BE} \approx 0,7V$$

Im 1. Schritt erhält man für  $R_I$  theoretisch:

$$R_I = \frac{0,7V}{2,0A} = 0,35\Omega$$

Für  $R_I$  wird ein Nennwert von 0,27  $\Omega$  gewählt. Der Nennwert bezieht sich auf 20° C für Raumtemperatur. Mit zunehmender Erwärmung steigt jedoch sein Widerstandswert an. Des Weiteren wurde am  $T_3$  eine maximale Basis-Emitter-Spannung von lediglich 0,65 V gemessen.

Es kann jetzt der maximale Fahrstrom bei 20° C berechnet werden:

$$I_{FS+_{max}} = \frac{U_{R1\_max}}{R_I(\vartheta_{20})}$$

$$I_{FS+_{max}} = \frac{0,65V}{0,27\Omega}$$

$$\underline{\underline{I_{FS+_{max}} = 2,41A}}$$

Bei einem stabilen Arbeitspunkt mit einer angenommenen Höchsttemperatur von 80° C wird jetzt der maximale Fahrstrom berechnet. Unter Berücksichtigung des Temperaturkoeffizienten für Eisen erfolgt die Bestimmung des Widerstandswertes bei 80° C:

$$R_1(\vartheta_{80}) = R_1(\vartheta_{20}) \cdot (1 + \alpha_{Fe} \cdot \Delta\vartheta)$$

$$R_1(\vartheta_{20}) = 0,27\Omega \cdot \left(1 + 0,0066 \frac{1}{K} \cdot 60K\right)$$

$$\underline{\underline{R_1(\vartheta_{20}) = 0,38\Omega}}$$

Der Fahrstrom vermindert sich auf einen Wert von:

$$I_{FS+_{\max}} = \frac{U_{R1_{\max}}}{R_1(\vartheta_{80})}$$

$$I_{FS+_{\max 80}} = \frac{0,65V}{0,38\Omega}$$

$$\underline{\underline{I_{FS+_{\max 80}} = 1,71A}}$$

Man erhält um den festgelegten Wert des maximalen Fahrstromes einen Toleranzbereich von +20% bis -15%. Auf eine Temperaturkompensation wurde bewusst verzichtet.

#### Basisstrom der Leistungstransistoren

Für den maximalen Fahrstrom muss über die Basis-Emitter-Strecke von T1 mindestens ein Basisstrom fließen von:

$$I_{B_{T1}} = \frac{I_{FS+_{\max}}}{B_{T1}} \quad \text{mit} \quad B_{\text{Darlington-Transistor}} \geq 1000 \text{ nach Datenblatt}$$

$$I_{B_{T1}} = \frac{2,4A}{1000}$$

$$\underline{\underline{I_{B_{T1}} = 2,40mA}}$$

Basisspannungsteiler

Nach der Knotenregel gilt folgende Beziehung:

$$I_{R5} = I_{R3} + I_{B\_T1} + I_{D1} \quad ; \quad I_{CE\_T3} = 0$$

Der Basisspannungsteiler wird so dimensioniert, dass sich die Teilströme in etwa so aufteilen:

$$I_{R3} \approx 2 \cdot I_{B\_T1}$$

Nach Auswahl von  $R_3$  und  $R_5$  folgt für  $I_{R3}$ ,  $I_{R5}$  und  $I_{D1}$ :

$$I_{R3} = \frac{U_3}{R_3} = \frac{1,4V}{270\Omega} = 5,19mA$$

$$I_{R5} = \frac{U_5}{R_5} = \frac{20V}{2,2k\Omega} = 9,09mA$$

$$I_{D1} = I_{R5} - I_{R3} - I_{B\_T1} = 9,09mA - 5,19mA - 2,40mA = 1,50mA$$

Ansteuerung der Signaltransistoren durch die Digitalzentrale

Für den Basisspannungsteiler von  $T_5$  ist zusätzlich die Kollektor-Emitter-Strecke des Optokopplers zu berücksichtigen.

$$U_{R8} = U_{BE\_T5} + U_{CE\_Opto1} = 0,7V + 1,1V = 1,8V$$

Die Digitalzentrale liefert eine Ansteuerspannung von etwa 24 V. Für den Spannungsteiler wird ein Verhältnis von 11:1 festgelegt. Gewählt werden Werte für  $R_7$  mit 10 k $\Omega$  und für  $R_8$  mit 1 k $\Omega$ .

maximale Verlustleistung von T1

Für die Berechnung der maximalen Verlustleistung werden folgende Annahmen getroffen:

$U_{CE\_max+} = 8,0 V$  maximal tolerierter Spannungsfall der Kollektor-Emitter-Strecke  
an der Kurzschluss-Schwelle

$I_{C\_max+} = 2,0 A$  maximale Fahrstrom

$t_a / T = 0,5$  beide Darlingtontransistoren sind im Mittel zu je 50% angesteuert

$p_{schalt} = 1,25$  Zuschlag für Verluste bei Polaritätswechsel, Asymmetrien  
und Toleranzen der Bauteile

$$P_{V\_max} = U_{CE\_max+} \cdot I_{CE\_max+} \cdot \frac{t_a}{T} \cdot p_{schalt}$$

$$P_{V\_max} = 8V \cdot 2A \cdot 0,5 \cdot 1,25$$

$$\underline{\underline{P_{V\_max} = 10,0W}}$$

Endtemperatur des Leistungstransistors

Es wird ein Aufsteckkühlkörper mit einem Wärmewiderstand ( $R_{th\_K}$ ) von 9,9 K/W verwendet.

Weitere Angaben sind:

$R_{th\_j} = 1 K/W$  Wärmewiderstand des Leistungstransistors nach Datenblatt

$R_{th\_G} \approx 0,8 K/W$  Wärmewiderstand des Glimmers und weitere Grenzflächen geschätzt

$v_j \leq 150^0 C$  maximal zulässige Halbleitertemperatur nach Datenblatt

$v_u \approx 25^0 C$  Umgebungstemperatur

Zur Berechnung der Endtemperatur gilt folgender Ansatz:

$$P_{V\_max} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{th\_j} + R_{th\_G} + R_{th\_K}}$$

nach  $\vartheta_j$  umgestellt:

$$\vartheta_j = P_{V\_max} \cdot (R_{th\_j} + R_{th\_G} + R_{th\_K}) + \vartheta_u$$

$$\vartheta_j = 10,0W \cdot (1 K/W + 0,8 K/W + 9,9 K/W) + 25^0 C$$

$$\vartheta_j = 16,0W \cdot 11,7 K/W + 25^0 C$$

$$\underline{\underline{\vartheta_j = 142^0 C}}$$

Der Booster ist so ausgelegt, dass er an Kurzschluss-Schwelle dauerhaft betrieben werden kann. Bei Unterschreitung der Schaltschwelle für Kurzschluss muss nach einer bestimmten Zeit eine Abschaltung erfolgen, um Schäden am Booster selbst sowie im Fahrstromkreis oder an Schienenfahrzeugen zu verhindern.

Ermittlung der Werte für die Schaltschwellen ÜL und KS des Streckenschutzes

Es werden die Schaltschwellen für Überlast (ÜL) und Kurzschluss (KS) ermittelt.  $U_{d1}$  ist die gleichgerichtete Ausgangsspannung des Boosters.  $U_{d2}$  ist die vom Spannungsregler erzeugte Ausgangsspannung zur Versorgung der Operationsverstärker (OP). Des Weiteren ist  $U_{d1}$  um den Spannungsfall am Gleichrichter von ca. 1,4 V kleiner als der Betragswert der Fahrspannung.

$$U_{Ref} = 0,5 \cdot U_{d2} = 6,0V \quad \text{als Vergleichswert über den Spannungsteiler } R_{14} \text{ und } R_{15} \text{ erhält man am invertierenden Eingang des OP's}$$

Die Überlast spricht an, wenn die gleichgerichtete Ausgangsspannung  $U_{d1}$  folgenden Wert unterschreitet:

$$U_{d1\_ÜL} = U_{Ref} \cdot \frac{R_{10} + R_{11}}{R_{11}}$$

$$U_{d1\_ÜL} = 6V \cdot \frac{3,9k\Omega + 1,8k\Omega}{1,8k\Omega}$$

$$\underline{\underline{U_{d1\_ÜL} = 19V}}$$

Die Fahrspannung beträgt an der Überlast-Grenze 20,4 V.

Der Kurzschluss spricht an, wenn die gleichgerichtete Ausgangsspannung  $U_{d1}$  folgenden Wert unterschreitet:

$$U_{d1\_KS} = U_{Ref} \cdot \frac{R_{12} + R_{13}}{R_{13}}$$

$$U_{d1\_KS} = 6V \cdot \frac{3,9k\Omega + 2,7k\Omega}{2,7k\Omega}$$

$$\underline{\underline{U_{d1\_KS} = 14,6V}}$$

Die Fahrspannung beträgt an der Kurzschluss-Grenze 16,0 V. Mit einer eingangsseitigen Sollspannung von etwa 23 V für  $U_{d0+}$  und  $|U_{d0-}|$  bleibt  $U_{CE}$  für  $T_1$  und  $T_2$  sicher unter den geforderten 8 V.

Um ein etwas besseres Schaltverhalten der OP's zu erreichen, werden Mitkopplungswiderstände mit je 100 kΩ geschaltet. Dadurch entsteht ein Schmitt-Trigger. Er besitzt aber eine sehr schmale Schalthysterese mit einigen 100 mV. Die daraus entstehenden Schaltschwellen betragen für

$$\text{Überlast:} \quad U_{dl\_ÜL\_ein} = 18,8 \text{ V} \quad \text{und} \quad U_{dl\_ÜL\_aus} = 19,2 \text{ V}$$

$$\text{Kurzschluss:} \quad U_{dl\_KS\_ein} = 14,4 \text{ V} \quad \text{und} \quad U_{dl\_KS\_aus} = 14,8 \text{ V}$$

## 5.7 Auswertung, Datenaustausch und Software

Im Mikrocontroller befindet sich ein Programm, das in C/C++ geschrieben ist. Es erfüllt folgende Aufgaben:

- Freigabe der Leistungstransistoren
- Auswertung von Überlast und Kurzschluss
- Datenaustausch mit dem Leitrechner
- Ausgabe von Statusmeldungen (LED)

Von besonderem Interesse ist die Auswertung der Meldungen *Überlast* und *Kurzschluss*: Beide Meldeeingänge werden im Abfragezyklus von einer Millisekunde erfasst. Das Programm beinhaltet zwei Zählfunktionen jeweils für Überlast und Kurzschluss.

Überlast:

Bei H-Pegel wird der Zähler von 0 - bzw. bei Wiedereintritt  $> 0$  - beginnend jede Millisekunde um 1 erhöht. Die Zählung erfolgt bis 1000. Es folgt eine Statusmeldung „Überlast“.

Bei L-Pegel wird der Zähler von 1000 beginnend jede Millisekunde um 1 verringert. Die Zählung erfolgt bis 0. Die Statusmeldung „Überlast“ erlischt.

Kurzschluss:

Bei H-Pegel wird der Zähler von 0 beginnend jede Millisekunde um 1 erhöht. Die Zählung erfolgt bis 5000. Bei einem Zählerstand von 1000 folgt eine Statusmeldung „Kurzschluss“.

Bei einem Zählerstand von 5000 erfolgt die Abschaltung des Boosters.

Bei L-Pegel wird der Zähler jede Millisekunde um 1 verringert, sofern der Wert des Zählers unter 5000 ist. Die Statusmeldung „Kurzschluss“ erlischt.

Der Booster kann zweimal vom Fahrdienstleiter wieder zugeschaltet werden und der Zähler wird auf 0 gesetzt. Beim dritten Kurzschluss geht der Booster in Blockierung.

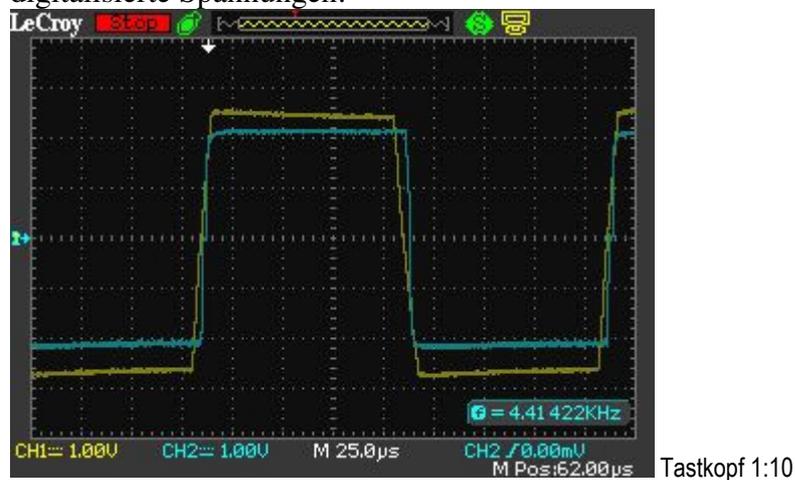
Bei Kurzschluss wird die Überlastmeldung unterdrückt.

Auf das Programm für den Analogbetrieb wird im Rahmen dieses Projektes nicht eingegangen.

## 5.8 Diagramme

Es wird nur ein Auszug der durchgeführten Messungen mit dem Oszilloskop wiedergegeben.

digitalisierte Spannungen:

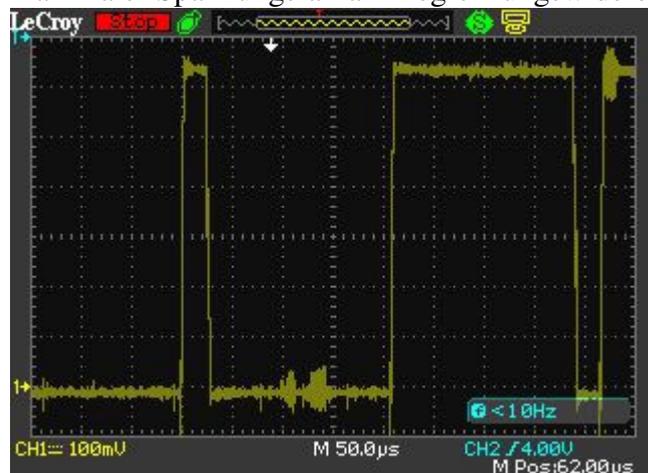


CH1: Digitalsignal von der Intellibox

CH2: digitalisierte Fahrspannung  $U_{d\_FS}$  am Ausgang des Boosters im Leerlauf

Auffallend ist die höhere Flankensteilheit des Boosters gegenüber der Intellibox. Die Antwortzeit des Boosters beträgt etwa 5  $\mu$ s.

maximaler Spannungsfall am Begrenzungswiderstand  $R_I$ :



CH1: Spannungsfall am  $R_I$  und gleichzeitig als  $U_{BE}$  von  $T_3$  mit etwa 0,65 V zu Beginn der Strombegrenzung unter Reallast

## 5.9 Literaturverzeichnis

- [1] NEM670; Digitales Steuersignal DCC – Bitdarstellung; Ausgabe 2007
- [2] NEM670; Digitales Steuersignal DCC – Basisdatenpakete; Ausgabe 2007
- [3] Märklin Motorola ??!
- [4] NEM680; Digitales Steuersignal SX – Bitdarstellung; Ausgabe 2006
- [5] NEM681; Digitales Steuersignal SX – Datenpakete, Betriebsfall; Ausgabe 2007
- [6] Datenblätter unter: <http://www.datasheetcatalog.com/>
- [7] Bauelemente und Grundsaltungen der Mikroelektronik; 8. Auflage; Pflaum-Verlag
- [8] Grundkurs Leistungselektronik – J. Specovius; 3. Auflage; Vieweg+Teubner

