

Verstärker mit PCL805 in Triodenschaltung



Die diesem Entwurf zu Grunde liegende Schaltung wurde von Frank Kneifel entwickelt und auf 'Jogi's Röhrenbude' veröffentlicht.

(Link zum Originalartikel: <http://www.jogis-roehrenbude.de/Leserbriefe/Frank-Kneifel-PCL805-Amp/Kapitel%201.htm>)

Somit waren zur Verstärkerelektronik selbst meinerseits keine weiteren Untersuchungen erforderlich.

Nach dem ich selbst auch schon mit der PCL805 gute Erfahrungen gemacht habe, war die Entscheidung, diesen Verstärker nachzubauen, schnell getroffen.

Weitere Entscheidungsgründe:

- Die Schaltung arbeitet mit preisgünstigen Übertragern, trotzdem werden sehr gute Ergebnisse erzielt.
- Die Röhren sind noch recht günstig zu bekommen.
- Es können einfache (und daher preiswerte) Netztrafo's verwendet werden.
- Zur Heizung können preiswerte Schaltnetzteile verwendet werden.

Beim Entwurf des Netzteils habe ich darauf geachtet, soviel als möglich vorhandenes Material zu verwenden.

1. Netzteil

U_{Br} = Brummspannung

I_{Gl} = Gleichstrom

f_{Br} = Brummfrequenz

f = Frequenz

ω = Kreisfrequenz ($2 * \pi * f$)

C = Kapazität

L = Induktivität

Der originale Schaltungsentwurf sieht keine Siebkette im Netzteil vor, es werden nur 'dicke' Siebelko's benutzt.

Da ich jedoch solch' dicke Brummer in meinem Fundus nicht habe, andererseits aber noch eine Siebdrossel 5H/220mA besitze, habe ich mich für eine Lösung mit Siebkette entschlossen.

Als erstes musste ich nun berechnen, welchen Restbrumm die originale Schaltung aufweist.

Der Betriebsstrom der Endstufe sowie die verwendeten Siebkapazitäten sind bekannt, der

Betriebsstrom beträgt knapp 60mA je Kanal, als Siebkapazität sind 1500µF pro Kanal vorgesehen.

Die Brummspannung lässt sich nun zu $U_{Br} = 200 \cdot (I_{Gl} / (C \cdot f_{Br}))$ berechnen.

In diese Formel wird der Gleichstrom I_{Gl} in mA, die Kapazität C in µF und die Brummfrequenz f_{Br} in Hz eingegeben.

Die Brummfrequenz beträgt hier 100Hz.

Daraus ergibt sich $200 \cdot (60mA / (1500µF \cdot 100Hz)) = 80mV$.

Als Kondensatoren stehen mir insgesamt 6 Stück 220µF/350V aus ehemaliger RFT-Fertigung zur Verfügung, aus Gründen der Symmetrie will ich jedoch mit 4 Stück auskommen.

Da ich noch einige Trafo's mit je 48V + 11,5V Sekundärspannung habe, werde ich zwei Stück davon in Reihe schalten und dann mit einer Spannungsverdopplerschaltung nach Delon arbeiten.

Die Delon-Schaltung erzeugt ebenso wie ein Brückengleichrichter eine Brummfrequenz f_{Br} von 100Hz.

Die genannten Trafos gab es vor ein paar Jahren sehr günstig bei Pollin-Electronic.

Jetzt muss ich allerdings mit dem Summenstrom beider Kanäle rechnen, da ich das Netzteil nicht Kanalgetrennt aufbauen will.

Daraus ergibt sich dann die Brummspannung zu $200 \cdot (120mA / (220µF \cdot 100Hz)) = 1,091V$.

Eine derart hohe Brummspannung ist natürlich für eine Eintaktendstufe viel zu hoch und muss nun durch eine zusätzliche Siebung reduziert werden.

Für eine Drossel-Elko-Kombination ergibt sich der Siebfaktor s zu $s = \omega^2 \cdot L \cdot C$, dabei ist ω die Kreisfrequenz, diese ergibt sich zu $2 \cdot \pi \cdot f_{Br} = 2 \cdot 3,14 \cdot 100Hz = 628$.

In dieser Formel ist die Kapazität C in Farad und die Induktivität L in Henry einzusetzen!

Somit errechnet sich der Siebfaktor meiner Drossel zusammen mit zwei parallel geschalteten 220µF-Kondensatoren zu $628^2 \cdot 5 \cdot (440 \cdot 10^{-6}) = 867$.

Daraus wird dann der tatsächliche Restbrumm am Ausgang der Siebkette $U_{Br} / s = 1,091 / 867 = 1,26mV$.

Daraus ist zu erkennen, dass eine Siebkette aus Drossel und Elko sehr effektiv arbeitet!

Im Netzteil sind noch insgesamt vier Heizstromregler enthalten (für jede Röhre einer) sowie eine Mikrocontrollergesteuerte Einschaltverzögerung für die Anodenspannung.

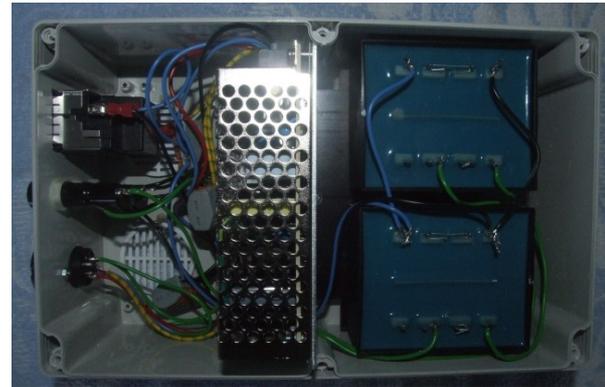
Die 24V Gleichspannung für die Heizregler werde ich aus einem Schaltnetzteil beziehen.

Alle Schaltpläne und Zeichnungen sind als PDF-Dateien auf dieser Homepage vorhanden.

Da ich aus Platzgründen für den Verstärker ein sehr kompaktes Gehäuse verwenden will, werden die Trafo's sowie das Schaltnetzteil in ein separates Gehäuse eingebaut und über ein mehradriges Kabel mit der Endstufe verbunden.

Gewählt habe ich hierfür ein Kunststoffgehäuse der Fa. BOPLA, Typ ET-241.

Leider hat dieses Gehäuse standardmäßig keine Lüftungsöffnungen, daher habe ich im Gehäuseunterteil vier Lüfterrosetten und im Oberteil zwei Lüftungsgitter eingebaut, die Teile dazu stammen aus dem Baumarkt (Möbellüfter), die erforderlichen Öffnungen habe ich mit der Laubsäge eingearbeitet.



Hier die fertig bearbeiteten Gehäuseteile.

Und so sieht das ganze fertig montiert aus.

Der im linken Bild sichtbare Trafoträger wurde aus einem Abfallstück Multiplexplatte gefertigt.

Die Lüftungsgitter wurden mit Schmelzkleber eingeklebt, ebenso die Trafo's auf dem Trafoträger.

Der Lochblechkasten in der Mitte des rechten Bildes ist das Schaltnetzteil für die Röhrenheizung und die Versorgung von Relais und Microcontroller, rechts daneben befinden sich die beiden Trafo's.

Im rechten Bild links von oben nach unten: Netzfilterbaugruppe, Sicherungshalter und Steckverbinder für das Anschlusskabel zum Verstärker.

In der Netzfilterbaugruppe befindet sich auch ein Kaltgerätestecker sowie die Hauptsicherungen und der Netzschalter.

2. Der Aufbau des Verstärkers

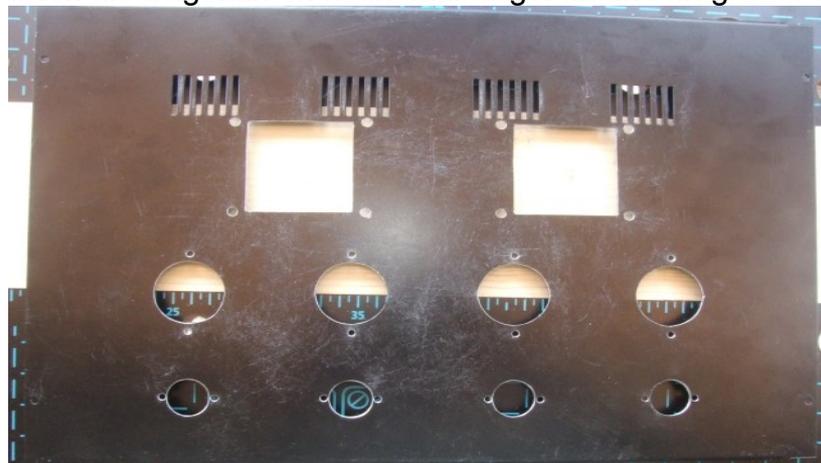
Die eigentliche Verstärkerschaltung wird in einem 19"-Stahlblechgehäuse mit 2HE aufgebaut.

Da ich noch ein baugleiches 3HE-Gehäuse vorrätig hatte (ist für den Vorverstärker vorgesehen), konnte ich mit der Bearbeitung der Deckplatte noch vor der Bestellung des Gehäuses beginnen.

Die Bohrungen für die Röhrenfassungen wurden mit einem Blechschälbohrer gefertigt, die Durchbrüche für die Übertrager sowie die großen Bohrungen für die Siebkondensatoren wurden mit der Laubsäge eingearbeitet.

Nach 1 ¾ Stunden und acht Sägeblättern war's dann geschafft, alle Durchbrüche sowie die Ausschnitte Ø 38 für die Siebkondensatoren waren ausgesägt.

Anschließend wurden die Sägekanten noch sauber gefeilt und entgratet.



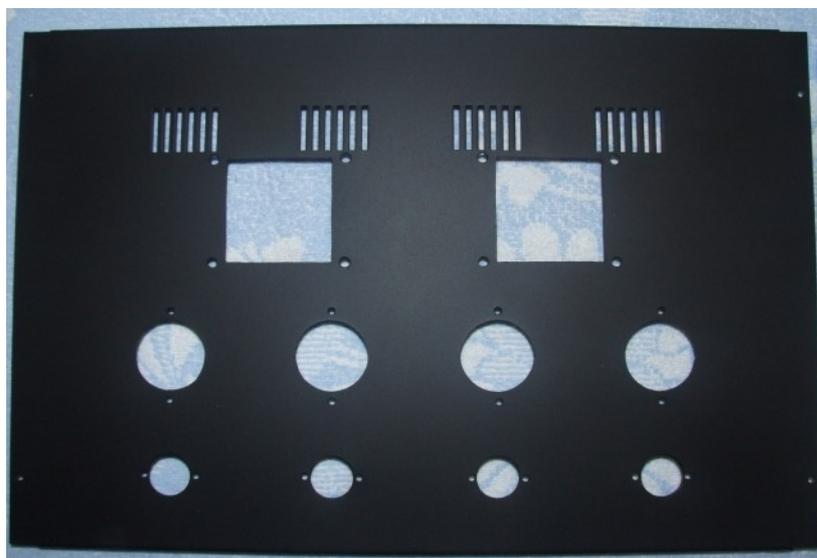
Der Verschleiß an Sägeblättern ist enorm, mehr als 150 – 200mm Schnittlänge halten die Laubsägeblätter in dem zähen Stahlblech nicht durch!
Nach der Fertigbearbeitung erfolgte noch die 'Anprobe' der Einzelteile, ob alles passt und keine Bohrungen vergessen wurden.



Hier sind alle Teile probeweise montiert, für die bessere Optik habe ich auch noch einen Röhrensatz eingesetzt.



Da das Gehäuse aus Stahlblech gefertigt ist, muss das Deckblech nach der Bearbeitung neu lackiert werden, damit die Schnittkanten und Bohrungen nicht rosten. Dabei wurden zuerst die Bereiche der Ausschnitte und Bohrungen mit Zinkfarbe besprüht, anschließend die Sichtseite noch grundiert und mit seidenmattem schwarzem Lack fertig lackiert:



Die Netzteilko's sind zwar unbenutzt, aber bereits 20 Jahre alt, daher habe ich mich ent-

schlossen, diese vor dem Einbau zu formieren.

Dazu werden die Elko's je eine Viertelstunde über einen Widerstand von 15 Kiloohm mit einer Gleichspannung von 300V geladen und anschließend wieder entladen.

Diese Zyklen wurden für jeden Elko vier Stunden lang durchgeführt.

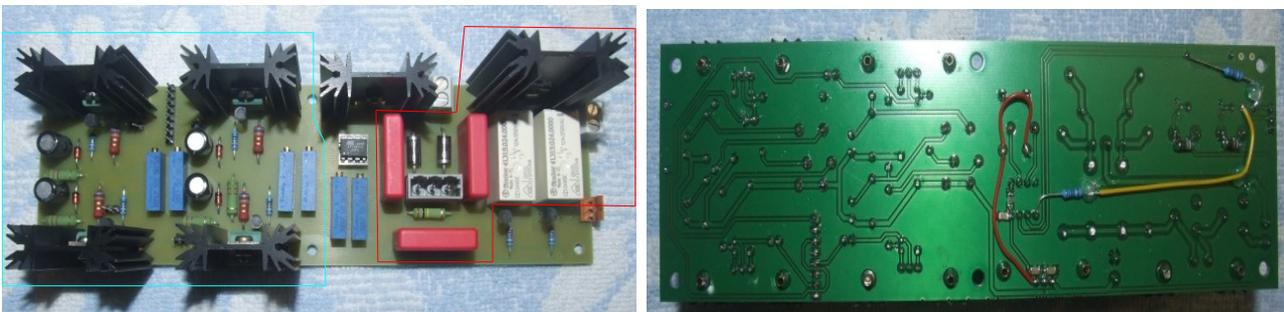
Nach dem formieren hatten die Kondensatoren noch einen Leckstrom von zwischen 23 und 33 μA !

Als nächster Arbeitsschritt erfolgte das Bestücken und testen der Steuerplatine.

Die Steuerplatine enthält die Anodenspannungsrelais samt Spannungsverdoppler (ohne Elko's), den Mikrocontroller der Einschaltverzögerung sowie die insgesamt vier Heizstromregler für die Röhren.

Wie auf den Bildern zu sehen, habe ich bei der Layouterstellung in der Eile vergessen, auf die Zugänglichkeit der Spindeltrimmer zu achten, zwei davon können nur mit einer Spitzzange verstellt werden.

Das in der Dateisammlung befindliche Leiterplattenlayout ist korrigiert, hier werden Spindeltrimmer mit von oben zugänglicher Spindel verwendet.



Die türkis umrahmten Teile gehören zu den Stromreglern für die Röhrenheizungen, die rot umrahmten Teile gehören zur Einschaltverzögerung und Spannungsverdopplung, am Steckverbinder zwischen den roten Kondensatoren werden die Elko's angeschlossen.

An dem großen Kühlkörper ist ein Dickfilmwiderstand montiert, dieser begrenzt den Lade-
strom der Netzteil-elko's und wird nach einiger Zeit (ca. 10 sek.) überbrückt.

In Bildmitte der Mikrocontroller (ATMEL ATtiny 13) zur Ansteuerung der Relais.

Durch eine noch vorgenommene Softwareanpassung musste auf der Leiterplatte noch eine 'Umverdrahtung' vorgenommen werden (gelbe Leitung und fliegend angebrachte Widerstände), die roten Drähte sind eine vergessene Leiterbahn.

Auch dies ist im aktuellen Leiterplattenlayout berücksichtigt!

Nachdem nun alle Gehäuseteile bearbeitet und lackiert sowie die Baugruppen vorgefertigt sind, beginnt jetzt Zug um Zug die Fertigmontage.

Als erstes wurde die Rückwand vormontiert und verdrahtet.

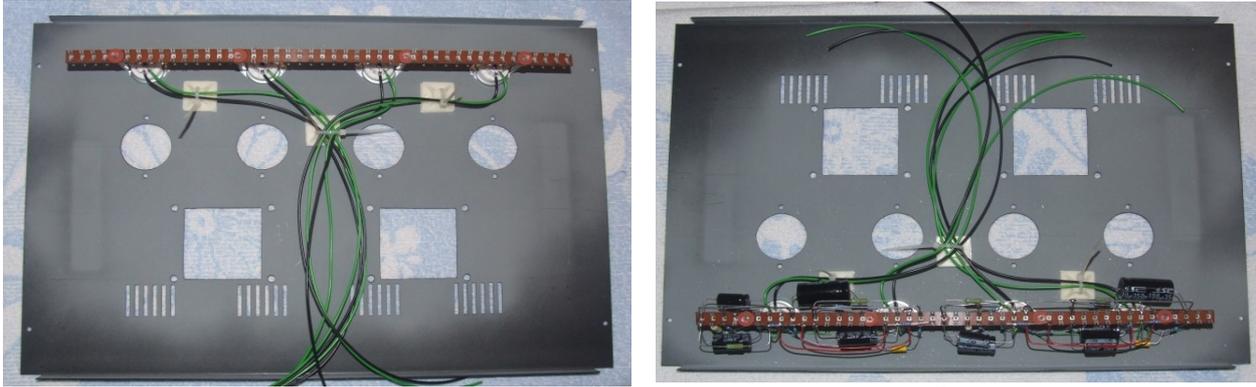


Die Rückwand trägt die Eingangs- und Lautsprecherbuchsen, ein Poti zur Pegelanpassung, die Steuerplatine sowie den Stromversorgungsstecker.

Der Gewindebolzen rechts neben dem Poti ist der zentrale Massepunkt, hier laufen alle Masseleitungen zusammen, ebenso wird hier die Gehäuseerdung hergestellt.

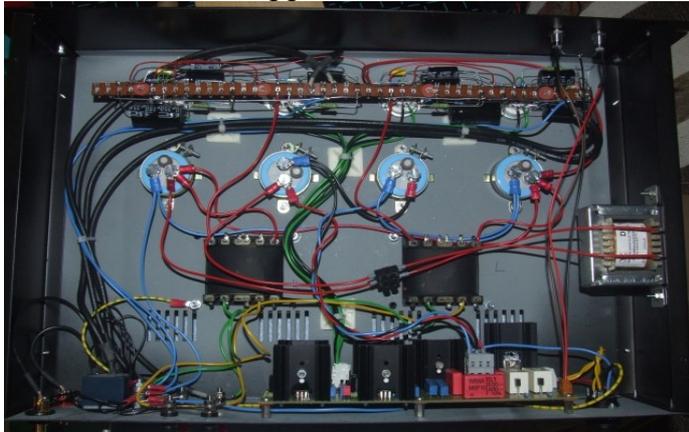
Am Chassisblech wurden zunächst die Röhrenfassungen montiert, die Lötösenleiste angebracht sowie die Leitungen der Röhrenheizungen verlegt.

Anschließend wurden die Bauteile der eigentlichen Verstärkerelektronik angelötet.



Als nächstes erfolgt dann der Einbau der Netzteilko's sowie der Übertrager und deren Verdrahtung, danach wurde dann das ganze mit der Rückwand verkabelt.

Ein Blick in den fertiggestellten Verstärker:



Hier hat der Verstärker die Inbetriebnahmeprozedur bereits hinter sich.

Jetzt muss nur noch das Verbindungskabel zur Stromversorgungseinheit fertiggestellt sowie die Trafohauben und die Bodenplatte montiert werden.

Rechts im Bild die Siebdrassel.

3. Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme erfolgte in mehreren Teilschritten, dazu habe ich jedoch noch nicht die endgültige Stromversorgungseinheit benutzt, sondern ein Labornetzgerät (24V für Heizung und Steuerung) sowie einen Stelltrentransformator für die 120V Wechselspannung.

Hier die Inbetriebnahmeprozedur in Kürze:

- Messung der Gesamtstromaufnahme der 24V-Seite (ca. 1,35A)
- Messen der Anodenspannungen an den Vorstufenröhren, nur rechter Kanal.
- Einbau der Brücke zum linken Kanal, messen der Anodenspannungen der Vorstufenröhren des linken Kanals.
- Einbau der Verbindung von den Anoden der Endröhren zum Ausgangsübertrager (nur rechter Kanal), Überprüfung auf Schwingneigung (falsche Polung der Gegenkopplung), abhören des rechten Kanals mit Musiksignal am Testlautsprecher.
- Ablöten der o.g. Verbindung, Einbau der Verbindung von den Endröhren zum Ausgangsübertrager (nur linker Kanal), Überprüfung auf Schwingneigung, abhören des linken Kanals mit Musiksignal und Testlautsprecher.
- Wiederherstellen der Verbindung des rechten Kanals, Test der eingestellten Verzögerungszeiten der Anodenspannungsrelais.
- Anbau der Frontplatte.
- Kurzer Probelauf, um die Brummfreiheit nochmals zu überprüfen.

Die endgültige Inbetriebnahme erfolgte dann nach Montage der Bodenplatte sowie der Trafohauben.

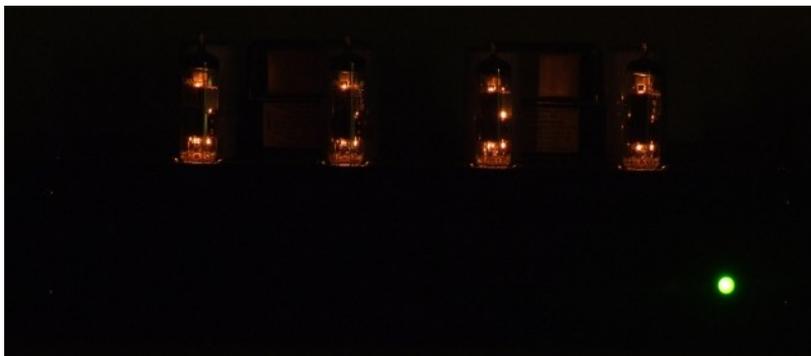
4. Hörprobe

Am 13.09.2010 nach der endgültigen Fertigstellung erfolgte im Zuge der Inbetriebnahme eine ausgiebige Hörprobe.

Es ist erstaunlich, was diese preiswerten Übertrager leisten!

Beim hören verschiedener Musikrichtungen, auch mit höheren Lautstärken, würde einem nie in den Sinn kommen, dass dieser Verstärker 'nur' etwa 2x 4,5W leistet.

Bei einer weiteren ausgiebigen Hörprobe konnte dieser Verstärker sogar eine 300B-Endstufe eines renomierten Herstellers auf die Plätze verweisen!



Besonders schön anzusehen ist das ganze abends bei abgeschalteter Raumbeleuchtung. Das geheimnisvolle glimmen der Röhrenheizungen macht das Musikhören noch viel schöner!

5. Projekttagbuch

Tag	Was wurde getan
05.08.10	Start der Planungen
09.08.10	Bestellung der Übertrager und Röhrenfassungen bei FJZ
11.08.10	Röhren bei Pollin bestellt
12.08.10	Beginn dieser Dokumentation
13.08.10	Stückliste erstellt
19.08.10	Teile bei Reichelt bestellt
19.08.10	Start Leiterplattenlayout für Gleichrichtung, Einschaltverzögerung und Stromregler.
26.08.10	Fertigstellung des Leiterplattenlayout und Bestellung der Leiterplatte, Bearbeitung des Netzteilgehäuses.
27.08.10	Fertigstellung des Stromversorgungsteils, mechanische Bearbeitung Verstärkerdeckplatte begonnen.
28.08.10	Deckplatte fertig bearbeitet, Probemontage durchgeführt, Deckplatte lackiert.
29.08.10	Gehäuse bestellt.
30.08. bis 07.09.10	Unterbrechung der Arbeiten wegen Urlaubsreise.
08.09.10	Alle bestellten Teile sind mittlerweile eingetroffen. Frontplatte und Rückwand bearbeitet, Netzteilko's formiert (2 von 4).

09.09.10	Restliche Netzteilko's formiert, Blechteile lackiert, Netzteil- und Steuerplatine aufgebaut, getestet und Stromregler eingestellt.
10.09.10	Rückwand vormontiert und verkabelt, Chassis Röhrenfassungen montiert, Heizleitungen und Teile der Verstärkerelektronik montiert.
11.09.10	Fertigstellung und Inbetriebnahme
12.09.10	Montage der Frontplatte und Test der Verzögerungszeiten, Kabelverlegung im Innern optimiert.
13.09.10	Erledigung der Restarbeiten (Bodenplatte anbringen, Trafohauben montieren) und endgültige Inbetriebnahme
15.09.10	Reinzeichnen der Maßzeichnungen, Abschluss der Dokumentation.

Das ganze ging nur deswegen so flott, weil ich den Großteil der Arbeiten während meines Sommerurlaubs ausgeführt habe.

6. Verfügbare Unterlagen

Dokumentname	Dokumenteninhalt
Schaltpläne:	
PCL805V	Schaltplan der Verstärkerelektronik
PCL805NT Blatt 1	Schaltplan des Netzteils und der Einschaltverzögerung
PCL805NT Blatt 2	Schaltplan der Heizstromregler
Zeichnungen:	
PCL805 Layout (steht auch als Datei für Sprint-Layout 5.0 zur Verfügung)	Layout der Leiterplatte für Heizstromregler und Einschaltverzögerung
PCL805 Bestückung Bauteilseite	Bestückungsplan der Bauteilseite
PCL805 Bestückung Lötseite	Bestückungsplan der SMD-Bauteile
PCL805 Deckplatte	Maßzeichnung Deckplatte des Gehäuses
PCL805 Rückwand	Maßzeichnung der Gehäuserückwand
Software:	
Heizung.asm	Assemblerdatei der Einschaltverzögerung (für ATtiny 13)
Heizung.hex	Hexfile für die Einschaltverzögerung
Heizung.pdf	Ausdruck des Assemblerlistings

Hinweis: Beim Programmieren muss der ATtiny 13 auf eine Taktfrequenz von 9,6Mhz und Teiler durch 8 eingestellt werden!

Ansonsten sind die Verzögerungszeiten nicht korrekt!