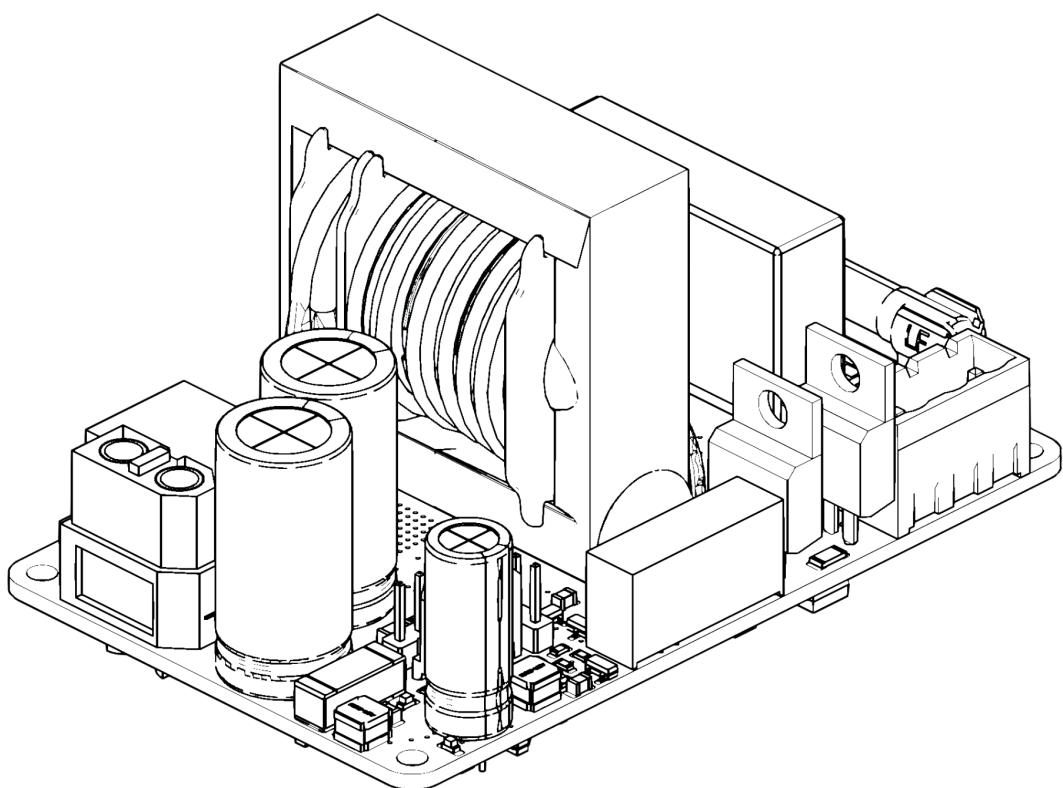


DCDCv9-3

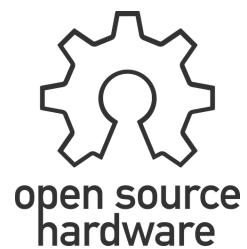
Build Guide



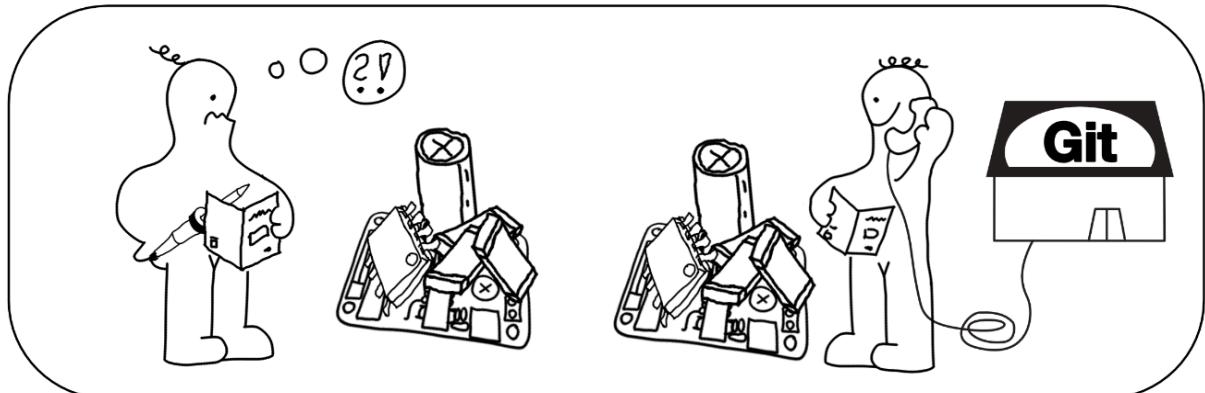
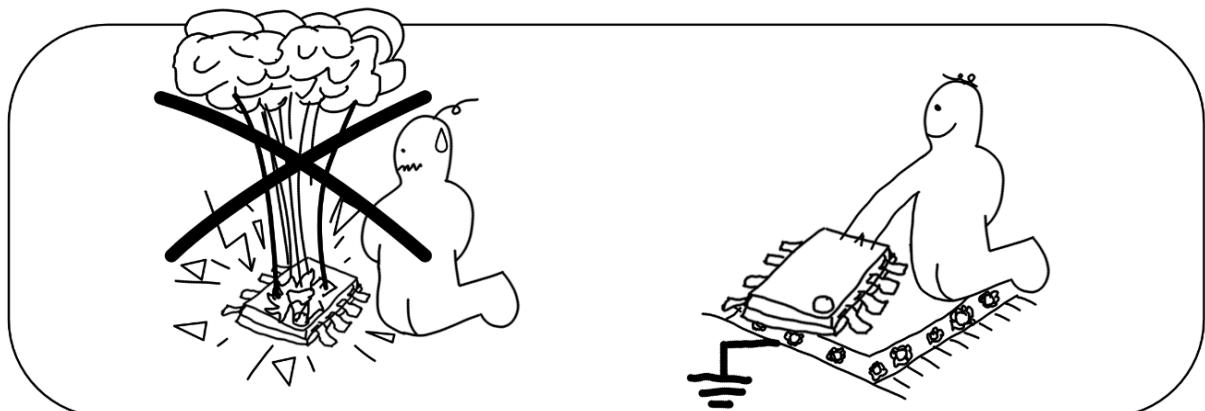
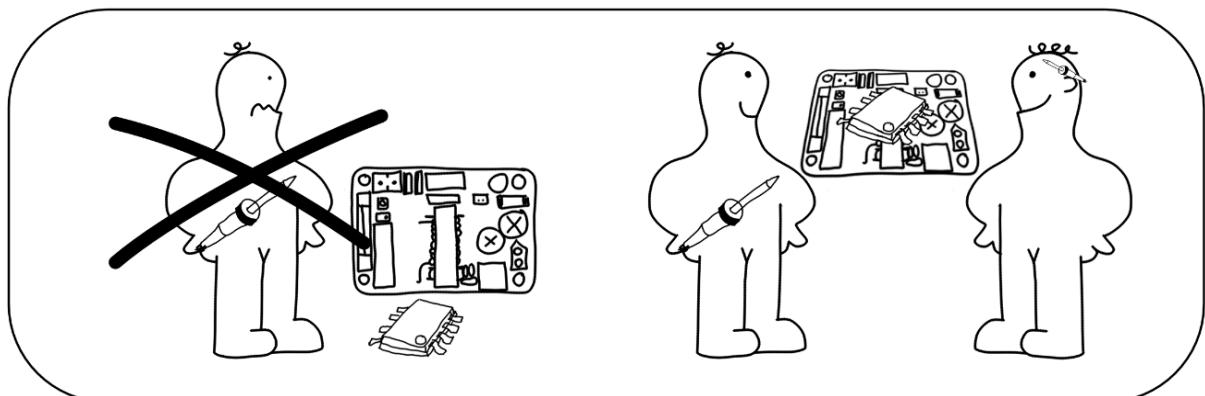
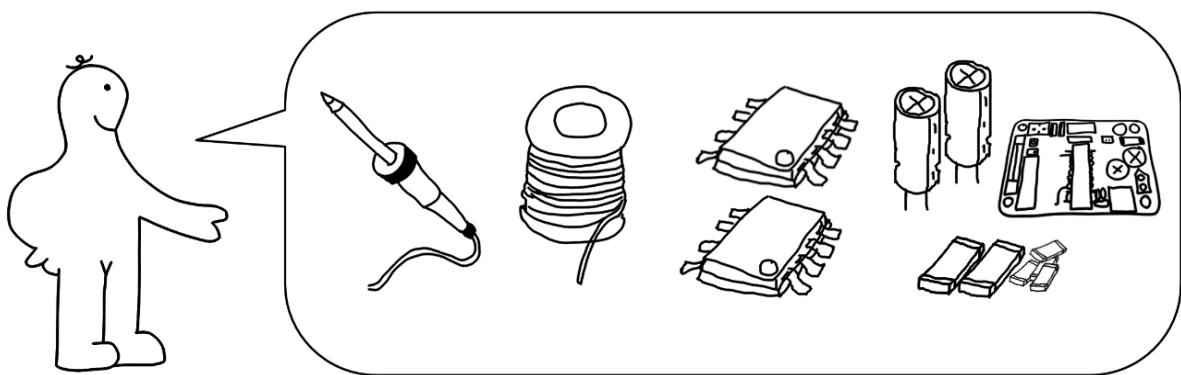
Autor:
Datum:
Handbuch für Hardware:
Sprache:
Lizenz:

Rootthecause
18. Juli 2025
v9-3 / v9-3r
Deutsch
CERN-OHL-W

GitHub: <https://github.com/Rootthecause/DCDC>



Open Hardware Logo von Macklin Chaffee,
lizenziert unter [CC SA 4.0](#)



Die oben gezeigte Anleitung ist eine Parodie. Sie steht nicht in Verbindung zu einem bestimmten Unternehmen oder dessen Produkten. Alle Elemente dieser Anleitung wurden eigenständig erstellt und dienen ausschließlich der Unterhaltung. Ein Anruf bei Git ist nicht möglich! Erstellen Sie stattdessen ein Git [Issue](#).

Inhaltsverzeichnis

1 Sicherheitshinweise.....	4
1.1 Informationen zur Auswahl und Bereitstellung von Bauteilen.....	5
1.2 Information zu KI-generierten Inhalten.....	5
2 Build Guide.....	6
2.1 Planung des Nachbaus.....	6
3 Bestellung der PCB und Bauelemente.....	7
3.1 PCB Assembly.....	9
3.2 Bestellung der Bauelemente.....	11
4 Beschaffung von Werkzeugen, Zusatzmaterialien und Messtechnik.....	12
4.1 Messtechnik, Spannungsquellen/Leistungssenken.....	13
5 Fertigung des Transformators.....	14
5.1 Hinweise zum SLA-Druck.....	15
5.2 Wie gewickelt wird.....	16
5.3 Wickeln der Primärwicklung.....	16
5.4 Wickeln der Sekundärwicklung.....	19
5.5 Verzinnen der Enden.....	19
6 Vermessung des Transformators.....	21
6.1 Isolationsprüfung.....	23
7 Löten der Bauelemente.....	24
7.1 Kabellose Aufsteckmontage.....	24
7.2 Reihenfolge.....	24
7.3 SMD-Bauteile.....	24
7.4 THT Bauteile.....	24
7.5 Reinigung.....	25
7.6 Conformal Coating.....	26
7.7 Lüfter und Temperatursensor.....	26
7.8 Diverses.....	27
8 Testen des Konverters.....	28
8.1 Erstinbetriebnahme.....	28
8.2 Initial Test (ohne HV an Input).....	28
8.3 Fehlersuche.....	29
8.4 Test Set-up.....	30
8.5 Allgemeine Hinweise zu den Messungen/Tests.....	31
8.6 Messliste.....	32
8.7 Checkliste.....	33
8.8 Minimale Schaltfrequenz (Fmin bzw. Poti RV2).....	35
8.9 Totzeit (dead time bzw. Poti RV1).....	37
8.10 Aktive Gleichrichtung (SR-Treiber).....	38
8.11 UVP/OVP Einstellen.....	40
8.12 Leistungstest.....	41
9 Bauteilkosten.....	43
10 Bildergalerie.....	44
11 Revisionsverlauf.....	48

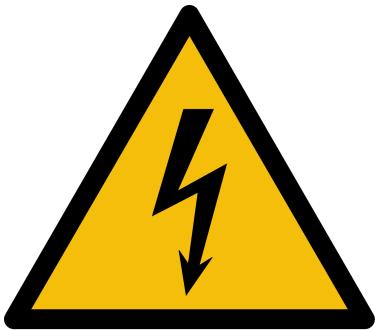
1 Sicherheitshinweise

Der Autor haftet weder für Schäden, die im Zusammenhang mit diesem Dokument stehen, noch garantiert er die Funktionstüchtigkeit oder Richtigkeit der beschriebenen Schaltungen und Sachverhalte. Der Nachbau der Schaltungen geschieht auf eigene Gefahr. Es ist stets mit Sachverständ und kritischen Hinterfragen zu hantieren, da sich trotz sorgfältiger Ausarbeitung Fehler in Beschreibungen und Darstellungen befinden können. Vor Inbetriebnahme ist eine Risikobewertung vorzunehmen und geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen. Eine Inbetriebnahme darf auf keinen Fall erfolgen, wenn bei Betrachtung des schlimmsten Fehlerfalls erhebliche Sach- oder Personenschäden möglich sind. Die beschriebenen Schaltungen dürfen nicht unbeaufsichtigt und nur von fachkundigen Personen betrieben werden. Es ist Sorge zu tragen, dass unbefugte Personen keine Änderungen oder Schalten eines Aufbaus vornehmen.



Hinweis

Der Autor beabsichtigt die Verwendung der beschriebenen Schaltungen nur in einer kontrollierten Laborumgebung. Für die Verwendung außerhalb dieser Umgebung ist die Funktionstüchtigkeit, Sicherheit und Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z. B. EMV-Vorschriften) von dem Anwender selbstständig zu überprüfen.



Achtung Hochspannung!

In dem Projekt wird mit Spannungen und Strömen gearbeitet, die bei unvorsichtiger Handhabung lebensgefährliche Gefahren wie Stromschläge, Feuer, schwere Verletzungen und den Tod verursachen können. Die Schaltungen sind nur mit der nötigen Vorsicht und den entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen zu verwenden. Das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung wie isolierende Handschuhe, Schutzbrille und elektrisch isolierende Schuhe sowie die Verwendung von isolierten Prüfgeräten und Netzteilen mit Überspannungs- und Überstromschutz wird zwingend angeraten.

Nach dem Einschalten dürfen keine Komponenten berührt werden, die mit der Schaltung verbunden sind. Das Messen während des Betriebs ist mit äußerster Vorsicht auszuführen, da ein Verrutschen der Messspitzen zu Kurzschlägen führen kann. Messgeräte sollten vor der Inbetriebnahme an den zu messenden Punkten installiert werden.

Spannungen und Ströme können wesentlich höher sein, als von Berechnungen oder Simulationen zu erwarten sind, da sie auf Modellen basieren können, welche unzureichend genau die Realität nachbilden. Aufgrund der Funktionsweise der Schaltungen ist es ebenso möglich, dass schaltungsintern Hochspannung vorhanden ist, obwohl die zugeführte Spannung um ein Vielfaches geringer ist. Komponenten wie Kondensatoren können auch nach Abschaltung mit hoher Spannung geladen sein!



Achtung heiße Oberflächen!

Einige Komponenten können Temperaturen über 55 °C erreichen. Der Benutzer darf diese Komponenten während des Betriebs oder unmittelbar nach dem Betrieb nicht berühren, da hohe Temperaturen vorhanden sein können und Verbrennungen verursachen.



Warnung!

Quellen-, Qualen- und Quellenangaben können unvollständig sein!

1.1 Informationen zur Auswahl und Bereitstellung von Bauteilen

Die Komponenten wurden unabhängig und ausschließlich auf Grundlage persönlicher Präferenzen gewählt und sind nicht an einen bestimmten Hersteller gebunden. Einige Bauteile (Q10, Q11) wurden kostenfrei als Muster im Rahmen der Formula Student von Infineon bereitgestellt, jedoch ohne jegliche Erwartungen oder Verpflichtungen. Abgesehen von dieser genannten Bereitstellung besteht keine Zusammenarbeit, kein Sponsoring und keine andere Verbindung zwischen den Herstellern und diesem Projekt. Sollte es in Zukunft zu einer Zusammenarbeit kommen, wird dies transparent kommuniziert.

1.2 Information zu KI-generierten Inhalten

Die vorherigen Abschnitte wurden mit KI-generierten Inhalten ergänzt oder in ähnlicher Form übernommen. Einige weitere Inhalte dieses Dokuments wurden zur Klarstellung sicherheitsrelevanter Aspekte mit KI-generierten Vorschlägen verbessert.

2 Build Guide

Liebe interessierte Leser,

dieser Build Guide soll helfen, einen DC/DC-Konverter erfolgreich nachzubauen. Zum Nachbau im Bereich der Formula Student sollte es mindestens ein Teammitglied geben, das sich die ganze Saison darum kümmert. Erfahrung im SMD-Löten mit Lötkolben und Heißluft sowie das Wissen über den Umgang mit Hochspannung wird empfohlen. Das Teammitglied sollte sich seiner Verantwortung bewusst sein, dass bereits eine von 500 Lötstellen zum Ausfall des DCDCs führen kann, und somit auch zum Ausfall des gesamten Niederspannungssystems. Darum bittet der Autor, dieses Projekt nur bei ausreichender Erfahrung und Vorhandenseins geeigneten Equipments in Erwägung zu ziehen.

Falls es beim Nachbau Probleme gibt, bitte ein [Issue](#) auf GitHub erstellen. Privatnachrichten zu technischen Problemen werden nicht beantwortet.

Anleitung für die Anleitung

Es empfiehlt sich, vor dem Beginn des Projekts den Build Guide zumindest überflogen zu haben, um den Aufwand grob abschätzen zu können. Beim Zusammenbau sollte dann das jeweilige Kapitel vollständig gelesen werden, bevor die Arbeitsschritte ausgeführt werden. Die Anleitung ist gültig für die Version v9-3r (Release), wobei einige Messungen sich auf die getestete v9-3 beziehen und nicht von der v9-3r unterscheiden.

2.1 Planung des Nachbaus

Vor dem Nachbau muss abgestimmt werden, ob die Platine leer oder bereits vorbestückt bestellt wird. Die Mindestbestellmenge bei PCB-Herstellern liegt oft bei 5 Stück. Die SMD-Bestückung lohnt sich kostentechnisch vor allem bei höheren Stückzahlen, jedoch überwiegt der geringere Aufwand beim Nachbau sowie verringerte Fehleranfälligkeit auch schon bei 5 Stück.

Planungsschritte

0. Verstehen der Funktionsweise des Konverters
1. Bestellung von PCB und Bauelemente (2-4 h, Lieferzeit 1-2 Wochen)
2. Beschaffung von Werkzeugen, Zusatzmaterialien und Messtechnik (individuell)
3. Fertigung des Transformators (1-2 Tage davon 2-5 h für den SLA-Druck)
4. Isolationstest und Vermessung des Transformators (1 Tag)
5. Löten der Bauelemente (bei leerer PCB 1-2 Tage, 80% bestückte PCB 2-3 Stunden)
6. Testen des Konverters (2-3 Tage basic Tests, 1-2 Wochen Langzeit- und Feldtest)

Insgesamt sollte ca. 1 Monat für eine Person ohne Nebentätigkeiten eingeplant werden, welche den Konverter zum ersten Mal nachbaut. Mehrere Personen können den Zusammenbau beschleunigen.

3 Bestellung der PCB und Bauelemente

Für die Bestellung der Platine (PCB) müssen die Gerber-Dateien [DCDCv9-3r.zip](#) aus dem Ordner [kicad/production](#) auf die Webseite eines Platinenherstellers hochgeladen werden. Ist eine Bestückung erwünscht, so muss der entsprechende Service (PCB Assembly) ausgewählt sein. Nachfolgende Einstellungen wurden genutzt, um bei dem Hersteller JLCPCB eine Platine inkl. Bestückung fertigen zu lassen.

Essenzielle Eigenschaften der Platine:

- 4-Lagig, FR4, Dicke: 1,6 mm
- Die äußeren Kupfer-Layer müssen mindestens 2 OZ Kupfer haben
- Die inneren Kupfer-Layer müssen mindestens 0,5 OZ Kupfer haben
- TG130 oder mehr
- Lötmaske: Schwarz, Matt (bessere Wärmeabstrahlung und Wärmebildmessung)

Hinweis: Die Maße der Platine betragen 85,6 x 54 mm. Wird jedoch PCB Assembly ausgewählt, sind Edge-Rails an den kürzeren Außenmaßen notwendig - diese werden bei entsprechender Option automatisch hinzugefügt. Die Edge-Rails sind mit einem V-Cut versehen und können mit einer Zange mühelos abgebrochen werden.

The screenshot shows the JLCPCB Gerber Viewer interface. At the top, there are two images of the PCB: a front-side view on the left and a back-side view on the right. Below the images, there are several configuration fields:

- Base Material:** FR-4 (selected)
- Layers:** 1, 2, 4 (selected), 6, 8, 10, 12, 14, 16, More
- Dimensions:** 85.6 * 70 mm
- PCB Qty:** 10
- Product Type:** Industrial/Consumer electronics (selected)
- PCB Specifications:** A dropdown menu containing:
 - Different Design: 1, 2, 3, 4, ...
 - Delivery Format: Single PCB (selected), Panel by Customer, Panel by JLCPCB
 - PCB Thickness: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6 (selected), 2.0
 - PCB Color: Green, Purple, Red, Yellow, Blue, White, Black (Black selected)
 - Silkscreen: White (selected)
 - Material Type: FR4-Standard TG 135-140, FR4 TG170, FR4 TG155 (FR4 TG155 selected)
 - Surface Finish: HASL(with lead), LeadFree HASL (LeadFree HASL selected), ENIG

High-spec Options

Outer Copper Weight	<input type="radio"/> 1 oz	<input checked="" type="radio"/> 2 oz			
Inner Copper Weight	<input type="radio"/> 0.5 oz	<input type="radio"/> 1 oz	<input type="radio"/> 2 oz		
Specify Layer Sequence	<input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Yes			
Impedance Control	<input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Yes	Impedance calculator >		
Via Covering	<input type="radio"/> Plugged	<input type="radio"/> Untented	<input type="radio"/> Epoxy Filled & Capped	<input type="radio"/> Copper paste Filled & Capped	<input type="radio"/> Tented
Min via hole size/diameter	<input type="radio"/> 0.3mm/(0.4/0.45mm)	<input type="radio"/> 0.25mm/(0.35/0.4mm)	<input type="radio"/> 0.2mm/(0.3/0.35mm)	<input type="radio"/> 0.15mm/(0.25/0.3mm)	
Board Outline Tolerance	<input type="radio"/> ±0.2mm(Regular)	<input type="radio"/> ±0.1mm(Precision)			
Confirm Production file	<input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Yes			
Mark on PCB	<input type="radio"/> Order Number	<input type="radio"/> Order Number(Specify Position)	New <input type="radio"/> 2D barcode (Serial Number)	Remove Mark	
Electrical Test	<input checked="" type="radio"/> Flying Probe Fully Test				
Gold Fingers	<input checked="" type="radio"/> No	<input type="radio"/> Yes			
Castellated Holes	<input checked="" type="radio"/> No	<input type="radio"/> Yes			
Press-Fit Hole	<input checked="" type="radio"/> No	<input type="radio"/> Yes (Tolerance +/-0.05mm)			
Edge Plating	<input checked="" type="radio"/> No	<input type="radio"/> Yes			

Advanced Options

4-Wire Kelvin Test	<input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Yes	
Paper between PCBs	<input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Yes	
Appearance Quality	<input type="radio"/> IPC Class 2 Standard	<input type="radio"/> Superb Quality	
Silkscreen Technology	<input type="radio"/> Ink-jet/Screen Printing Silkscreen	<input type="radio"/> High-precision Printing Silkscreen	<input type="radio"/> High-definition Exposure Silkscreen
Package Box	<input type="radio"/> With JLCPCB logo	<input type="radio"/> Blank box	

PCB Remark

Specify Layer Sequence:

Um sicherzugehen, dass die Layer in der richtigen Reihenfolge hergestellt werden, kann diese Option genutzt werden (funktioniert i. d. R. auch ohne).

Layer Sequence

L1(Top layer)	<input type="text"/> DCDCv9-3-F_Cu.gtl
L2(Inner layer1)	<input type="text"/> DCDCv9-3-In1_Cu.g2
L3(Inner layer2)	<input type="text"/> DCDCv9-3-In2_Cu.g3
L4(Bottom layer)	<input type="text"/> DCDCv9-3-B_Cu.gb

[Close](#) [Confirm](#)

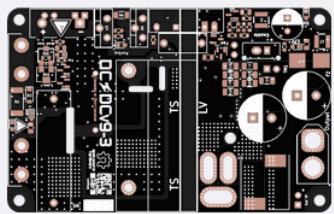
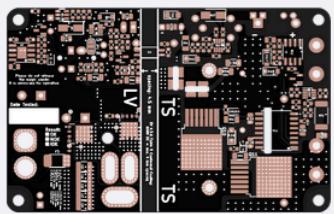
Die Bestellung eines Stencils kann bei manueller Bestückung erfolgen, um Lotpaste sauber aufzutragen. Bei geübten Umgang kann aber auch mit einer feinen Spritze für Lötpaste ein gutes Ergebnis erzielt werden.



PCB Assembly

COUPON

Free Assembly for your PCB order

 Assemble top side Assemble bottom side

PCBA Type

 Economic Standard[What's the difference?](#)

Assembly Side

 Top Side Bottom Side Both Sides

PCBA Qty

10

10

Qty from 2 to 10

Edge Rails/Fiducials

 Added by JLCPCB Added by Customer

The board size is modified to be 85.6mm*70mm due to adding two 5mm edge rails on the shorter sides. [Learn More>](#)

Confirm Parts Placement

 No Yes

Advanced Options

Photo Confirmation

 No

Board Cleaning

 No

Conformal Coating (cleaning included)

 No

Bake Components

 No

Packaging

 Antistatic bubble film

Depanel boards & edge rail before delivery

 No

Solder Paste

 Sn96.5%, Ag3.0%, C

Flying Probe Test

 No

Add paste for unpopulated pad & step stencil opening

 No

Others

 No

3.1 PCB Assembly

Im nächsten Bestellschritt können die BOM und CPL (Positionsdaten `positions.csv`) für die beidseitige Bestückung hochgeladen werden. Falls diese Fehlermeldung erscheint, kann sie ignoriert werden: “*The below parts won't be assembled due to data missing. NT1,NT2 designators don't exist in the BOM file. JP1 designator don't exist in the CPL file.*”

Hinweis: Anstatt der `bom.csv` ist die [`bom_for_JLC_PCBAs.csv`](#) zu verwenden. Sie beinhaltet nur Bauteile, welche JLC auf Lager hat (Zuletzt geprüft Jan. 2025). Bei allen Bauteilen, welche mit einem gelben Ausrufezeichen auf der Webseite markiert sind, war der Abgleich nicht exakt möglich oder es haben sich Änderungen im Lagerbestand ergeben. Diese sind entsprechend mit geeigneten Bauteile zu aktualisieren. Die wichtigsten Kriterien für geeignete Ersatzteile sind:

- gleicher Footprint
- gleicher Wert (Widerstand, Kapazität), bei ICs gleiche Herstellernummer
- gleicher oder größere Spannungsfestigkeit sowie Nennleistung (Widerstand, Kapazität)

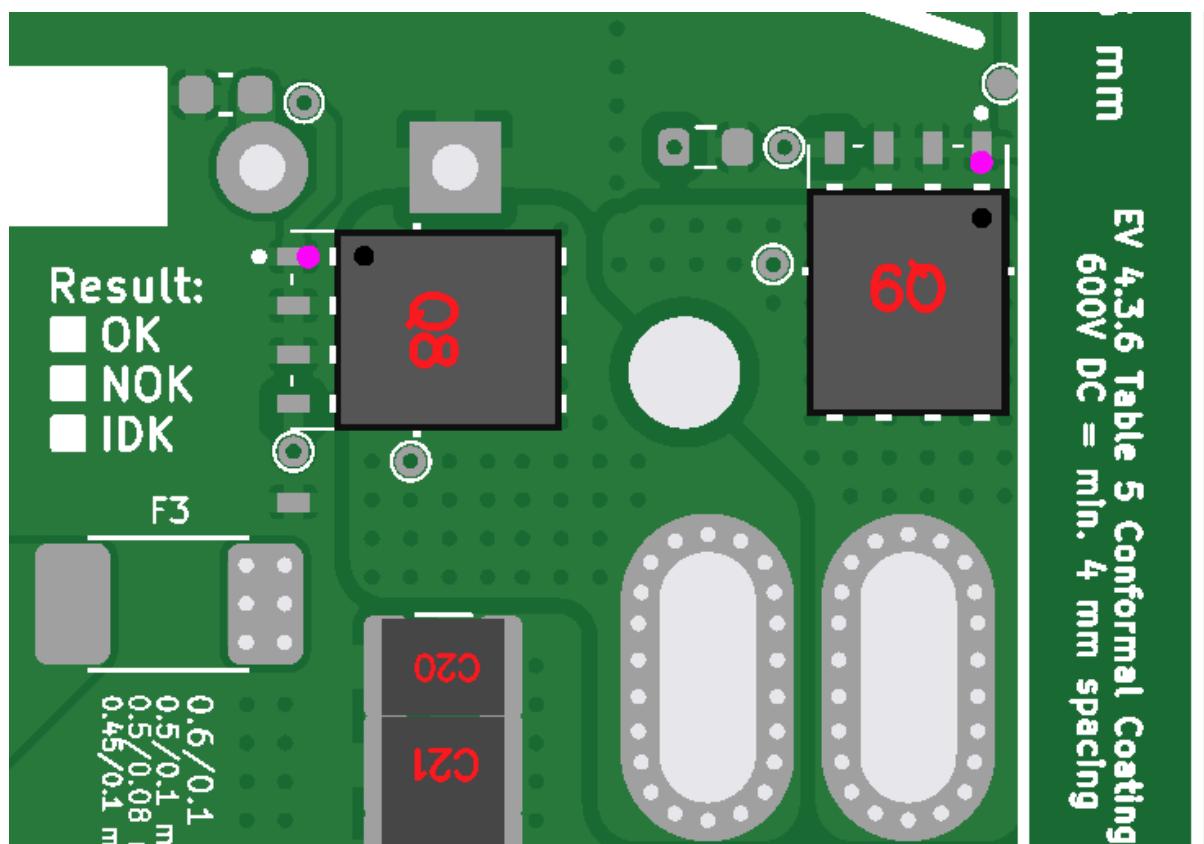
Können keine passenden Bauteile ermittelt werden, müssen sie z. B. bei Mouser bestellt und manuell verlötet werden.

Uploaded BOM Data				Review Matched Parts						
Top Designator	Bottom Designator	Comment	Footprint	Matched Part Detail		Qty	Source	Lib Type	Total Cost	<input checked="" type="checkbox"/> Select
C14,C32	100nF	C_0603_1...	C_0603_1...	CC0603KRX7R9BB104	C14663	20	JLCPCB	Basic	€0.0465	<input checked="" type="checkbox"/>
C15,C40,C41	2.2uF	C_0805_2...	C_0805_2...	CL21A225KBQNNNE	C377773	23	JLCPCB	Basic	€0.3209	<input checked="" type="checkbox"/>
C16	1nF	C_0603_1...	C_0603_1...	CL10B102KBQNNNC	C1588	20	JLCPCB	Basic	€0.0523	<input checked="" type="checkbox"/>
C17,C19,C25,C2...	1uF	C_0603_1...	C_0603_1...	CL10A105KBQNNNC	C15849	40	JLCPCB	Basic	€0.1628	<input checked="" type="checkbox"/>
C18,C27,C33,C46	10uF	C_0805_2...	C_0805_2...	CL21A106KAYNNNE	C15850	30	JLCPCB	Basic	€0.2587	<input checked="" type="checkbox"/>
C20,C21,C22,C2...	10uF	C_1210_3...	C_1210_3...	GRM32ER71J106KA12L	C437568	25	JLCPCB	Extended	€8.0354	<input checked="" type="checkbox"/>
C26,C44	22nF	C_0603_1...	C_0603_1...	CL10B223KBQNNNC	C21122	20	JLCPCB	Basic	€0.0640	<input checked="" type="checkbox"/>
C29	47pF	C_0603_1...	C_0603_1...	CL10C470JBQNNNC	C1671	20	JLCPCB	Basic	€0.0698	<input checked="" type="checkbox"/>
C30	10nF	C_0603_1...	C_0603_1...	0603B103K500NT	C57112	20	JLCPCB	Basic	€0.0446	<input checked="" type="checkbox"/>
C39	470pF	C_1206_3...	C_1206_3...	1206B471K102NT	C9189	20	JLCPCB	Extended	€0.2151	<input checked="" type="checkbox"/>
C42	22uF	C_0805_2...	C_0805_2...	CL21A226MAQNNNE	C45783	20	JLCPCB	Basic	€0.4167	<input checked="" type="checkbox"/>

Ausschnitt des Matched Parts Review einer PCBA Bestellung bei JLC. Hinweis: Die angegebene Stückzahl entspricht der Gesamtstückzahl für alle zu bestückenden PCBs.

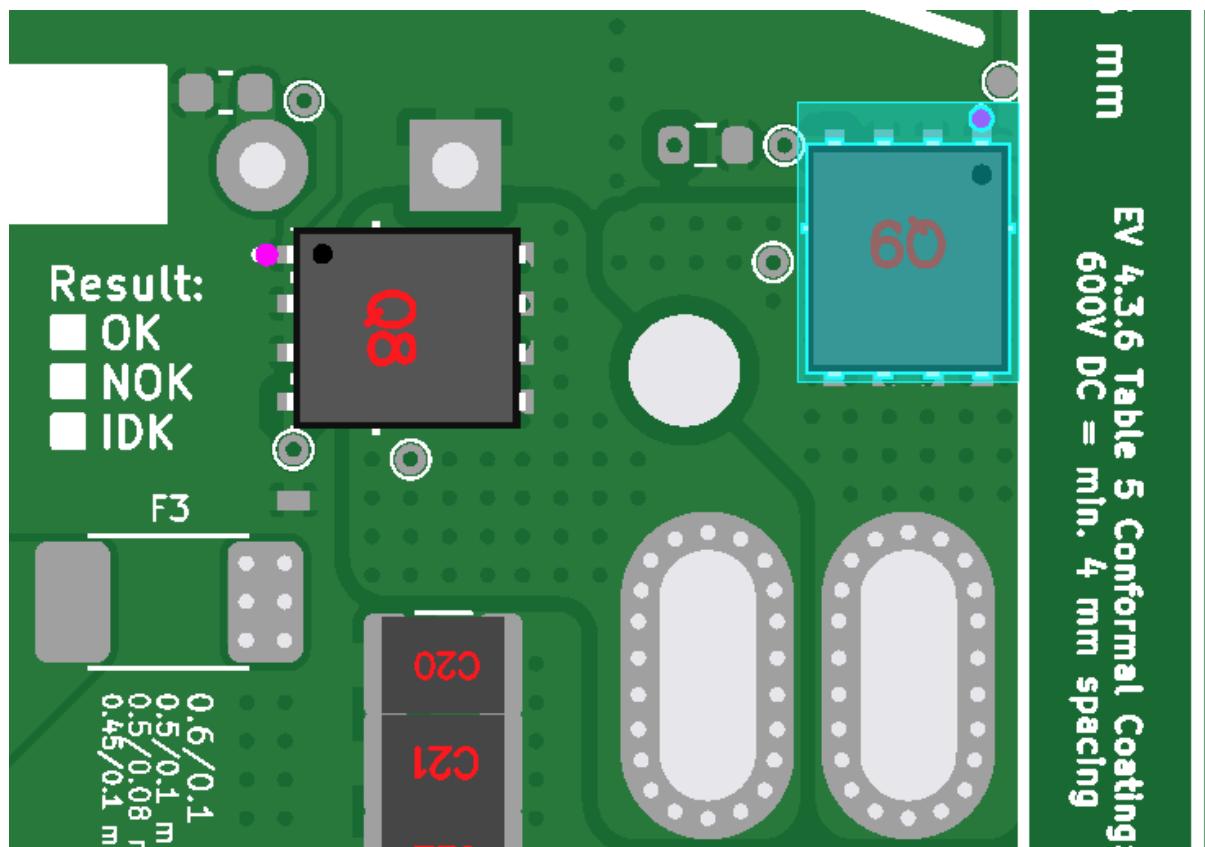
Component Placement

Nach dem Überprüfen der Bauteilzuweisung muss das Placement überprüft werden. Das Placement war bei dem DCDCv9-3 soweit in Ordnung, außer Q8 und Q9 (Rückseite).



Placement Q8 (zu weit rechts) und Q9 (zu weit unten)

Das Placement muss durch Anklicken des Bauteils und Verschieben mit den Pfeiltasten korrigiert werden.



Placement Q8 und Q9 korrigiert, Q9 ist angewählt

Einige Bauteile werden als Schachbrettmuster dargestellt. Diese sind nicht als 3D-Modell bei JLC vorhanden, stellen aber in der Regel kein Problem für die Bestückung dar.

Anschließend werden die Gesamtkosten angezeigt. Als Produktbeschreibung (Zoll) kann "Reserach\Education\DIY\Entertainment" und die Unterkategorie "DIY - HS Code 902300" gewählt werden. Nach dem Hinzufügen in den Warenkorb ist das Versandunternehmen auszuwählen. Je nach Größe der Bestellung sind nicht alle Versandoptionen verfügbar. Für die PCBA wurde ein Versand nach Deutschland mit FedEx gewählt (Zoll Zahlung online). Es wird empfohlen, sich im Vorhinein über die Versandunternehmen und den aktuellen Erfahrungsberichten mit den jeweiligen PCB-Herstellern zu informieren.

Zukünftiges

Aktuell ist es nicht möglich, ein PCB-Design bei JLC über einen öffentlichen Link zu bestellen. Daher bleibt bei diesem Hersteller nur die Möglichkeit, selbst alle Bestell-Optionen zu konfigurieren. Der Hersteller PCBWay hingegen bietet die Möglichkeit, öffentliche Designs zu erstellen. Bei entsprechendem Zeitbudget behält sich der Autor vor, den DCDC dort zu veröffentlichen.

3.2 Bestellung der Bauelemente

Wenn eine PCB bestellt wurde (ohne Bestückung), müssen die Bauelemente in der [DCDCv9-3_kicad_full_bom](#) bestellt werden. Wenn eine PCBA bestellt wurde (mit Bestückung) müssen die Bauelemente in der [DCDCv9-3_Mouser_BOM_for_PCBA](#) bestellt werden.

Es empfiehlt sich, den BOM bei Mouser im Bereich "Warenkorb" (leerer Warenkorb vorausgesetzt) hochzuladen. Durch Wählen der entsprechenden Spalten (Stückzahl, Herstellernummer) können die Bauelemente automatisch dem Warenkorb hinzugefügt werden. Hinweis: Es befinden sich Bauelemente in der BOM, welche nicht bei Mouser bezogen werden können.

4 Beschaffung von Werkzeugen, Zusatzmaterialien und Messtechnik

Folgende Werkzeuge und Materialien sind zusätzlich zur PCB und dessen Bauelementen für den Nachbau notwendig.

Die verlinkten Produkte wurden vom Autor verwendet, da sie verhältnismäßig budgetfreundlich sind. Selbstverständlich können andere Produkte genutzt werden, die zum Teil besser in der Handhabung sein können. Wenn Sie den Autor unterstützen möchten, können Sie den Affiliate-Link "Amazon Affiliate" verwenden, bei dem der Autor eine kleine Provision erhält, wenn ein Kauf getätigkt wird. Wenn Sie den Autor nicht unterstützen möchten, nutzen Sie bitte den Link "Amazon".

Name	Quelle/Link
SLA-Drucker (FDM-Drucker nicht zulässig!)	beliebig
Resin	https://www.3djake.de/licreate/flame-retardant-hdt (UL94-v0) oder (günstiger, kein UL94-v0) https://www.3djake.de/phrozen/tr300-ultra-high-temp-resin-grau
3M™ Scotch-Weld™ DP100FR	https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/p/d/b40066500/
120er + 400er Carbid Schleifpapier (nicht nötig bei N27+N97 Kern mit Luftspalt)	Amazon Affiliate Amazon
Ebene Oberfläche zum Schleifen (harter Kunststoff, Glas oder Stein) (nicht nötig bei N27+N97 Kern mit Luftspalt)	
Doppelseitiges Klebeband (zum Befestigen des Schleifpapiers) (nicht nötig bei N27+N97 Kern mit Luftspalt)	
Seitenschneider	Amazon Affiliate Amazon
Lötkolben + kleine und große Lötpitzen (leistungsstarker Lötkolben für das Verzinnen und Verlöten der Transformator-Litzen empfohlen)	Amazon Affiliate Amazon
Lötzinn Der gesamte Konverter kann bei entsprechender Erfahrung mit einem bleifreiem Lot gelötet werden.	Amazon Affiliate Amazon
Lötpaste (+ Spritze zum Auftragen, falls nicht mit Stencil), keine niedertemperatur Bismut-Legierungen!	Amazon Affiliate Amazon
Flussmittel (+ Spritze zum Auftragen)	Amazon Affiliate

	Amazon
Lötheizplatte	Amazon Affiliate Amazon (oder was besseres)
Heißluft Lötstation	Amazon Affiliate Amazon (oder was besseres, wobei die gut funktioniert)
Küchenpapier (zum Reinigen)	-
Ultraschallreiniger für PCB + Bürste	Amazon Affiliate Amazon
Isopropanol	Amazon Affiliate Amazon
Schrumpfschlauch	Amazon Affiliate Amazon
HF-Litze (Querschnitte und Längen siehe Trafo-bau)	Ebay
XT60 Stecker (1x Male, 1x Female)	Amazon Affiliate Amazon
Anschlusskabel LV	Amazon Affiliate Amazon
Anschlusskabel TH1	Amazon Affiliate Amazon
Anschlusskabel HV (min. 85°C Rating)	-
Enable Schalter und Molex-Microfit (male)	Selbst löten/crimpen
Conformal Coating: Plastik 70 (Super) Hinweis: Plastik 70 (standard) wird in Formula Student nicht mehr empfohlen.	Amazon Affiliate Amazon
Lüfter 30 x 30 x 7 mm, 5V, 5 m³/h (bei Nennspannung)	Amazon Affiliate Amazon
Federklemmen (Set)	Amazon Affiliate Amazon
Kabelbinder, klein (2,5 bis 3 mm Breite)	-

4.1 Messtechnik, Spannungsquellen/Leistungssenken

Name	Quelle/Link
AC-Hochspannungsquelle min. 1800 V _{rms} für Isolationsprüfung	-
Einstellbare DC-Hochspannungsquelle bis 600 V / 2A bzw. min. 500 W	z.B. 2x Delta Elektronica SM 400-AR-4 (in Reihe)

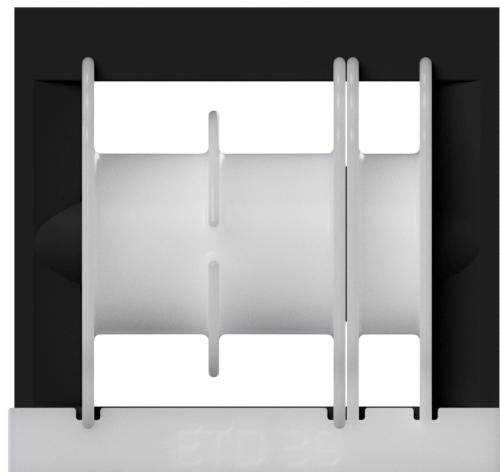
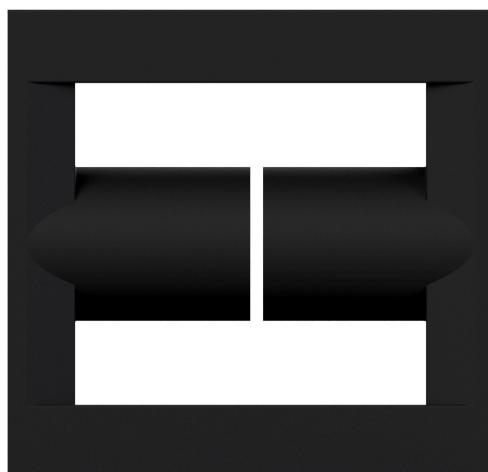
	alternativ 1500 W Wechselrichter (Isolation) bzw. Trenntransformator + DIY PFC
4x Multimeter für Wirkungsgradmessung oder entsprechende Leistungsmesser	z.B. UNI-T UT139C oder UT61E+
DC Last 24V bis 31,25 A	2x DPS5020 zum CV/CC Einstellen Amazon Affiliate Amazon Polylux-Lampe als Last Amazon Affiliate Amazon
LCR-Meter (ausreichend für Nachbau) (für Entwicklung wird ein Impedanzanalysator empfohlen z.B. Analog Discovery 2 oder 3 mit Erweiterungsboard Impedanzmessung)	Analog Discovery 3 Impedanz Analysator
Oszilloskop (entweder mit galv. isolierten Eingängen oder mit Akkubetrieb)	z.B. Micsig TO3004
Hochspannungs Probe 1:100	Amazon Affiliate Amazon

5 Fertigung des Transformators

Das Herzstück des DC/DC-Konverters bildet der selbstentwickelte Ferritkerentransformator.

Für den **ETD39** Trafo des DCDCv9-3r wird benötigt:

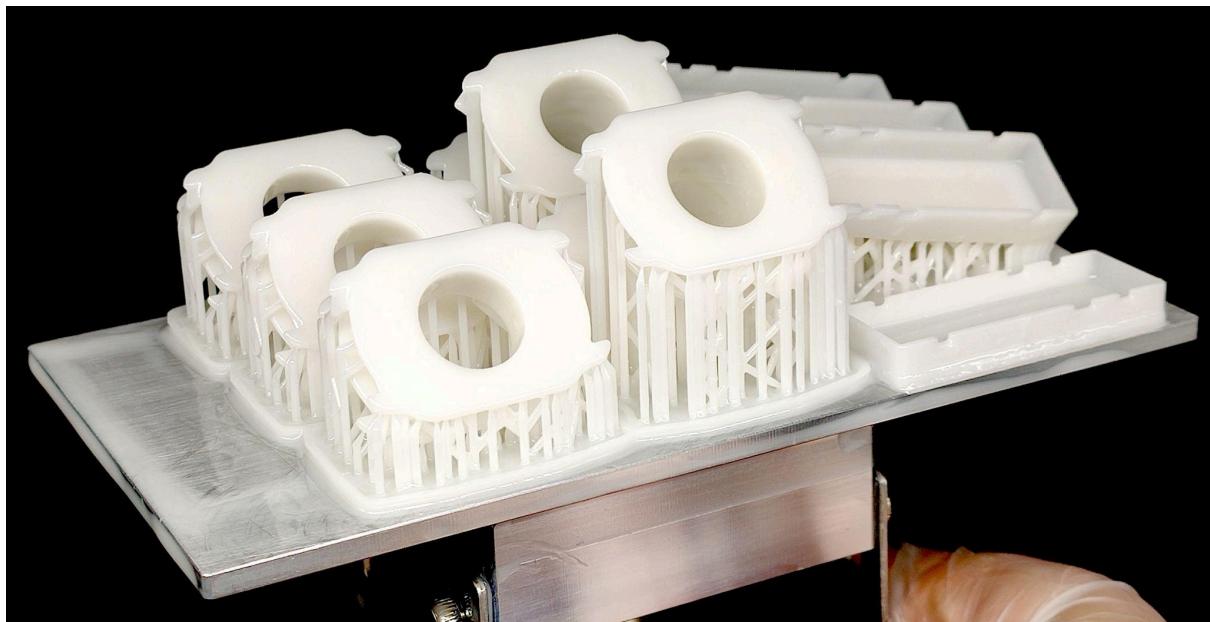
- 1800 mm 120 x 0,1 mm HF-Litze für 28 Windungen (Primär)
- 165 mm 600 x 0,071 mm für 2 Windungen (Sekundärwicklung 1 innen)
- 185 mm 600 x 0,071 mm für 2 Windungen (Sekundärwicklung 2 außen)
- SLA-Gedruckte Spulenhalter ([Prim](#), [Sek](#), [Isolator](#))
- Ferritkernhälften (Größe ETD39):
 - 1x N27 mit 1,0 mm Luftspalt Herst.-Nr.: B66363G1000X127
 - 1x N97 ohne Luftspalt Herst.-Nr.: B66363G0000X197



Kernhälften mit Luftspalt (rechte Hälfte), Spulenhalter Prim (links) Sek (rechts) und Isolator (unten)

5.1 Hinweise zum SLA-Druck

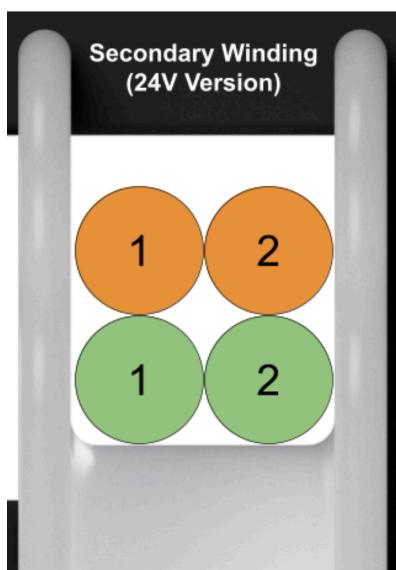
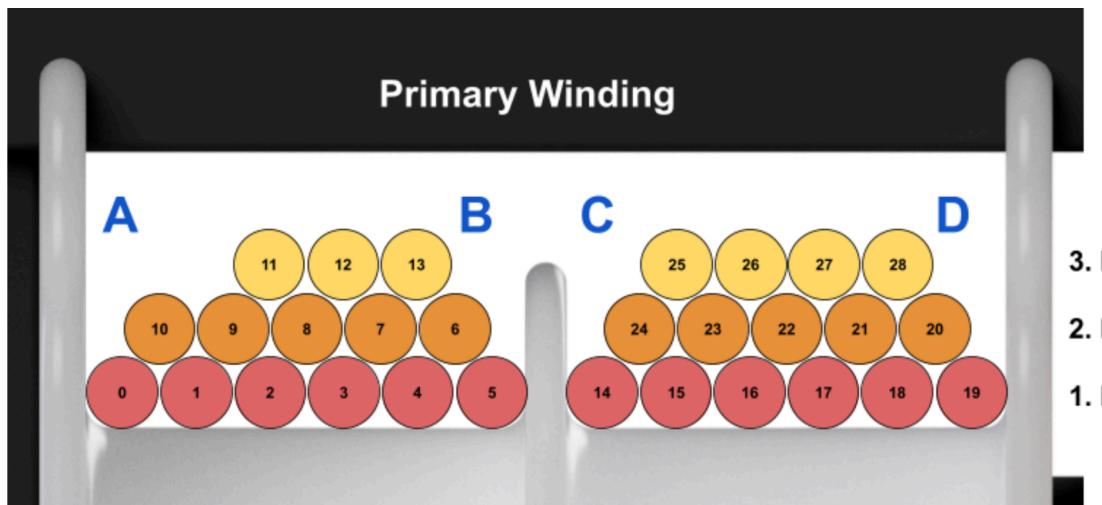
- Es ist optisch zu prüfen, dass alle Pixel beim LCD- bzw. DLP-SLA-Druck funktionstüchtig sind
- Die Modelle sollen so ausgerichtet werden, dass der mittlere Zylinder (um welchen die Spule gewickelt wird) äußerlich keine Stützstruktur aufweist, um eine glatte Oberfläche zu erhalten und die Isolation der Leiter nicht zu beschädigen.
- Halter dürfen auf keinen Fall Löcher, Risse, Verunreinigungen oder Delamination aufweisen.
- Modelle können bei mechanischer Belastung scharfkantig brechen, es ist daher um Vorsicht im Umgang geboten. Bereits geringe Fallhöhen können zum Bruch führen.
- Es sind die nötigen Sicherheitsvorschriften im Umgang mit SLA-Druckern und dem UV-Harz (Resin) zu beachten und Verbrauchsmaterialien sowie Materialreste ordnungsgemäß zu entsorgen.
- Die Drucke sind gemäß Herstellerangaben mit UV-Licht auszuhärten
- Nach Fertigstellung ist zu prüfen, ob die Drucke leichtgängig auf die Kernhälften aufgesteckt werden können und beim Zusammenfügen beider Kernhälften mit den Drucken ein leichter Spielraum vorhanden ist. Dieser wird benötigt, da sich beim Erwärmen des Transformators die Halter geringfügig ausdehnen. Sollten die Halter nicht auf die Kernhälften passen, sind Schrumpfanpassungen in den Druckeinstellungen vorzunehmen. Sollte ein Spielraum beim Zusammenfügen zwischen den Kernhälften vorhanden sein, ist die Dicke der flachen Endplatten (Spulen Halter) zu prüfen. Liegt sie bei mehr als 1,0 mm ist das Schleifen zulässig, insofern dies vor dem Isolationstest geschieht.
- Abgebrochene "Haken" ("Dornen" "Öhrchen") an den Drucken sind zulässig, wenn der Verdrehschutz auf den Ferritkernen gewährleistet wird (alternativ: verkleben).



SLA-Druck der ETD39-Spulenhalter mit Stützstruktur nach dem Druck

5.2 Wie gewickelt wird

Der Wickelsinn (im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn) der Primärspule spielt keine Rolle, solange sie auf der Spule immer gleich bleibt. Der Halter der Primärspule hat in der Mitte einen Trenner, um die drei Lagen zu stabilisieren und zusätzlichen Isolationsabstand zu gewinnen. Die gezeigte Anordnung wurde gewählt, um einen Kompromiss zwischen Windungskapazität, Isolationsspannung zwischen den Windungen und Komplexität der Wicklung zu erreichen. Sie ist eine Mischung aus U-Wicklung und sektionierter Wicklung.



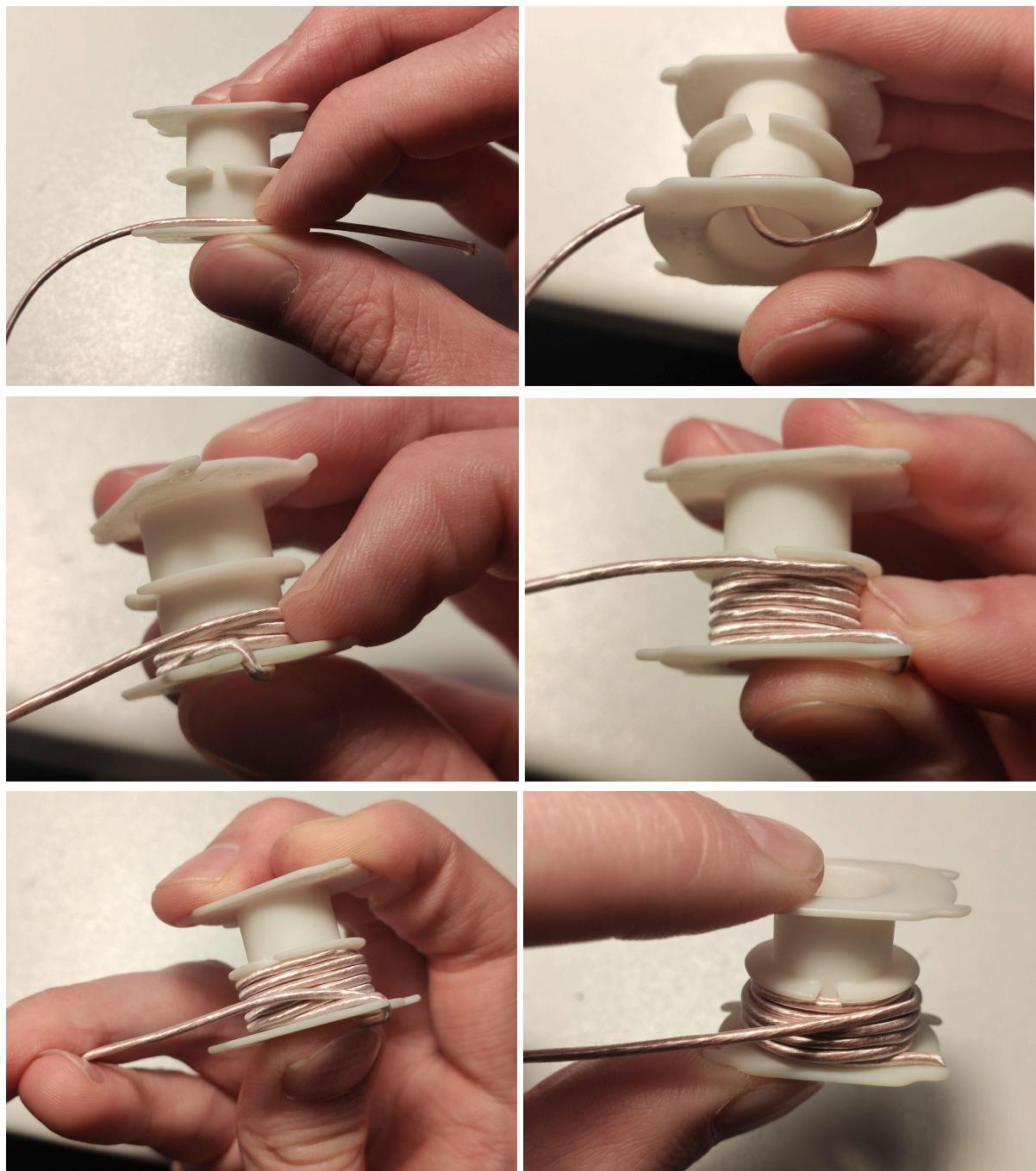
Tipp: Ein schwarzer Permanentmarker oder kurzes Stück Schrumpfschlauch kann genutzt werden, um die Enden der gleichen Sekundärwicklung zu unterscheiden.

Der Wicklungssinn ist sowohl bei der Primärwicklung als auch bei der Sekundärwicklung irrelevant. Es wird empfohlen, die beiden Sekundärwicklungen im gleichen Wicklungssinn zu wickeln. Jedoch ist beim Anschluss der Sekundärwicklungen darauf zu achten, dass die Wicklungen von der Mittelanzapfung (Pin 4) aus betrachtet einen entgegengesetzten Wicklungssinn haben bzw. entgegengesetzte Spannungen erzeugen. Ob Pin 3 oder 5 vertauscht sind, ist irrelevant, da der Aufbau symmetrisch ist. Sollte beim Testen der Primärstrom sehr unsymmetrisch sein, ist eventuell eine Sekundärwicklung falsch herum angeschlossen. Manchmal ist auch ein Fiepen zu hören.

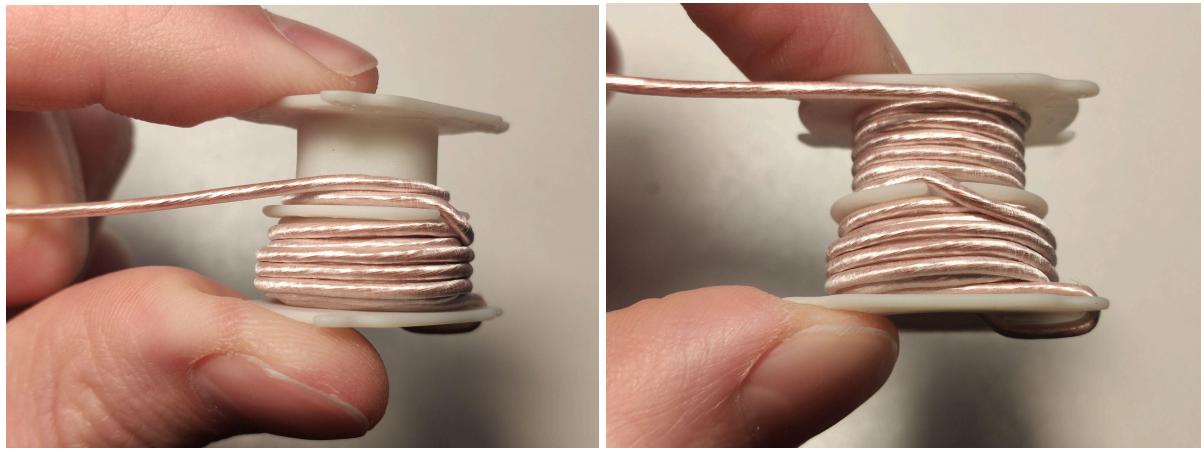
5.3 Wickeln der Primärwicklung

Etwa 3 cm der HF-Litze werden hinter einem der Haken umgeknickt. Das überstehende Stück wird beim Wickeln in den Spulenhalter gebogen und beim Wickeln mit einem Finger gegen den Halter gedrückt. Anschließend werden die Windungen nach dem obigen Wickelschema um den Spulenhalter gewickelt. Es ist darauf zu achten, dass die HF-Litze straff aufgebracht wird, um eine saubere und platzsparende Wicklung zu erreichen. Die

letzte Windung der ersten Lage kann aufgrund des geringen Platzes bereits vor dem vollständigen Umschließen auf die nächste Lage gewickelt werden.



Nachdem die erste Hälfte aufgewickelt wurde, wird auf die zweite Hälfte im gleichen Wicklungssinn weiter gewickelt wie bei der ersten Hälfte, jedoch umfasst die letzte Lage eine Windung mehr.



Nach der letzten Windung kann das Ende HF-Litze über einen weiteren Haken gebogen werden. Der gesamte Vorgang kommt bis zu diesem Punkt ohne Klebstoffe aus. Anschließend wird etwas 2K-Kleber links oben und rechts unten aufgetragen, um die Wicklung zu fixieren.

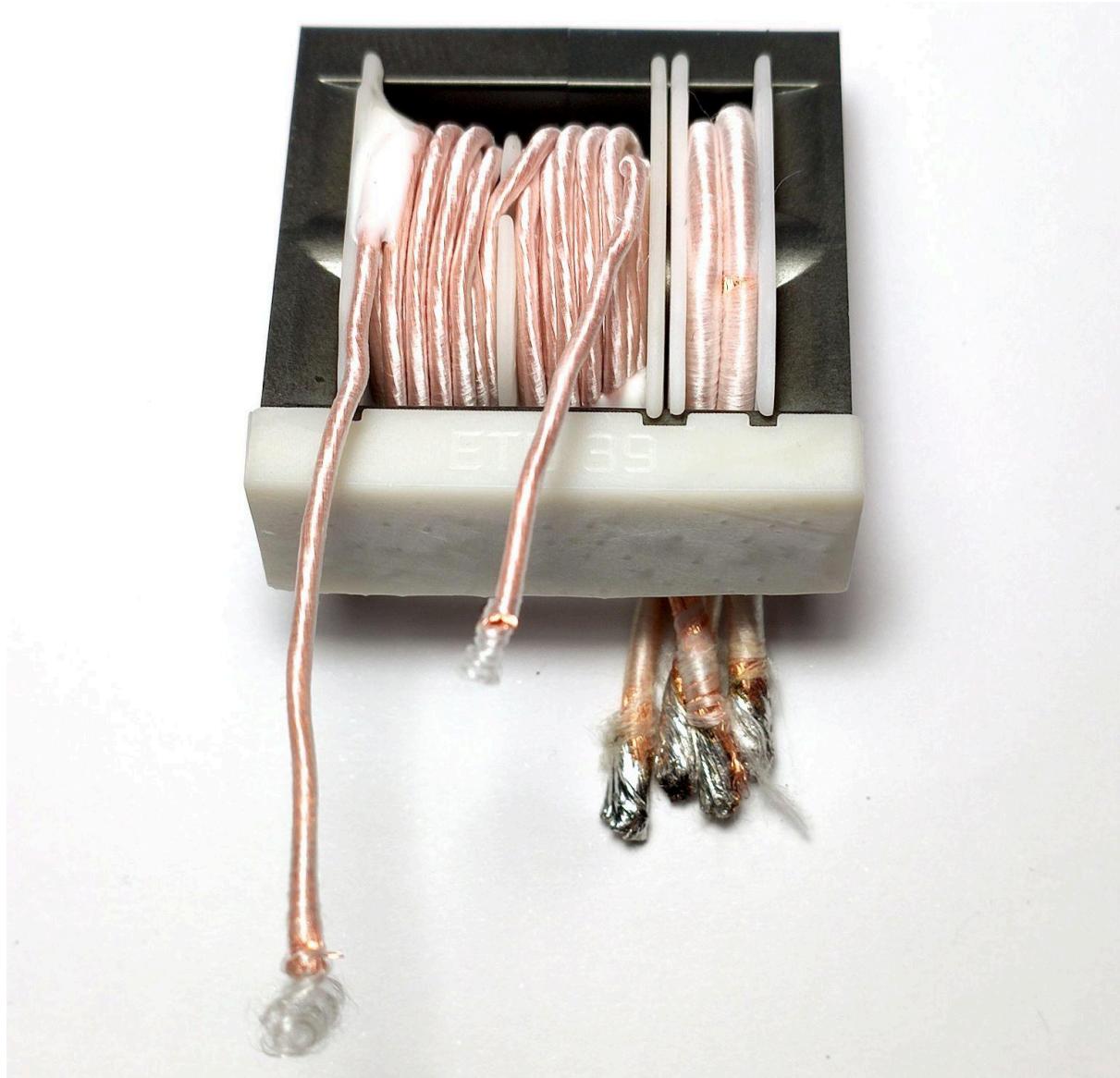


Pro-Tipps:

- Wenn man zu viele Klebezettel als Werbegeschenk bekommen hat, kann man sie verwenden, um 2K-Kleber darauf zu rühren.
- Übrig gebliebene PTFE-Röhrchen aus einem Bowden-3D-Drucker können zum Anrühren des 2K-Klebers verwendet werden. Wenn es ausgehärtet ist, kann es leicht aus dem Rohr entfernt und wiederverwendet werden (haftet nicht am PTFE).
- Heißluft (z. B. von einer Lötzstation) kann verwendet werden, um den 2K-Kleber zu erwärmen. Durch die Erwärmung werden die Luftblasen im 2K-Kleber entfernt und die Viskosität verringert. Dies führt zu einer schönen Oberfläche, auch wenn das Epoxidharz bereits am Aushärten ist.
- Durch Legen des PTFE-Röhrchens in den Rest des 2K-Klebers hat man eine gute Referenz, wie hart das Epoxidharz auf dem Transformator ist, ohne dass man es berühren muss.

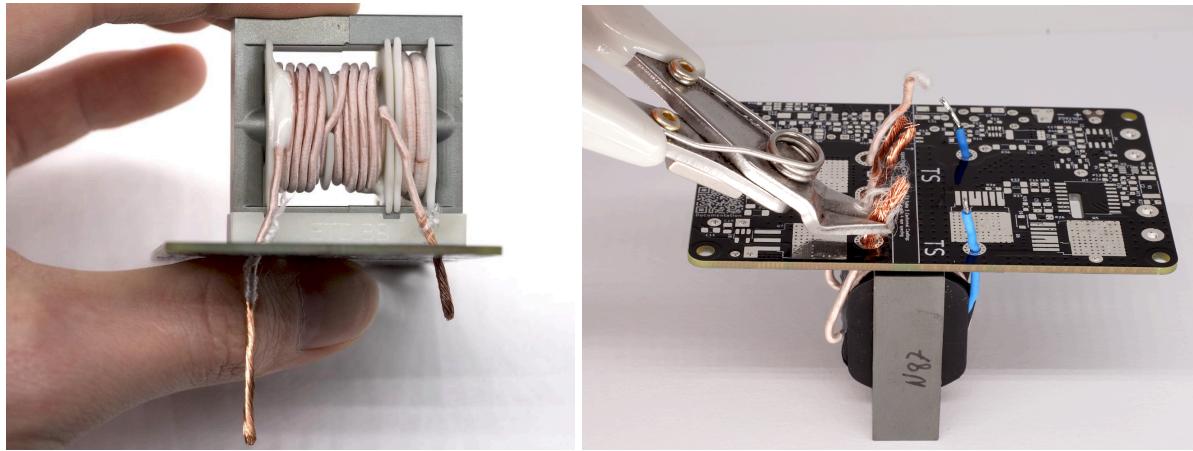
5.4 Wickeln der Sekundärwicklung

Die kürzere HF-Litze wird zuerst mit zwei Windungen aufgebracht. Anschließend wird die längere HF-Litze im gleichen Wicklungssinn auf die bereits vorhandenen Windungen aufgewickelt. Ein Verkleben der Sekundärwicklungen ist nicht nötig, kann aber beim Einbau hilfreich sein.



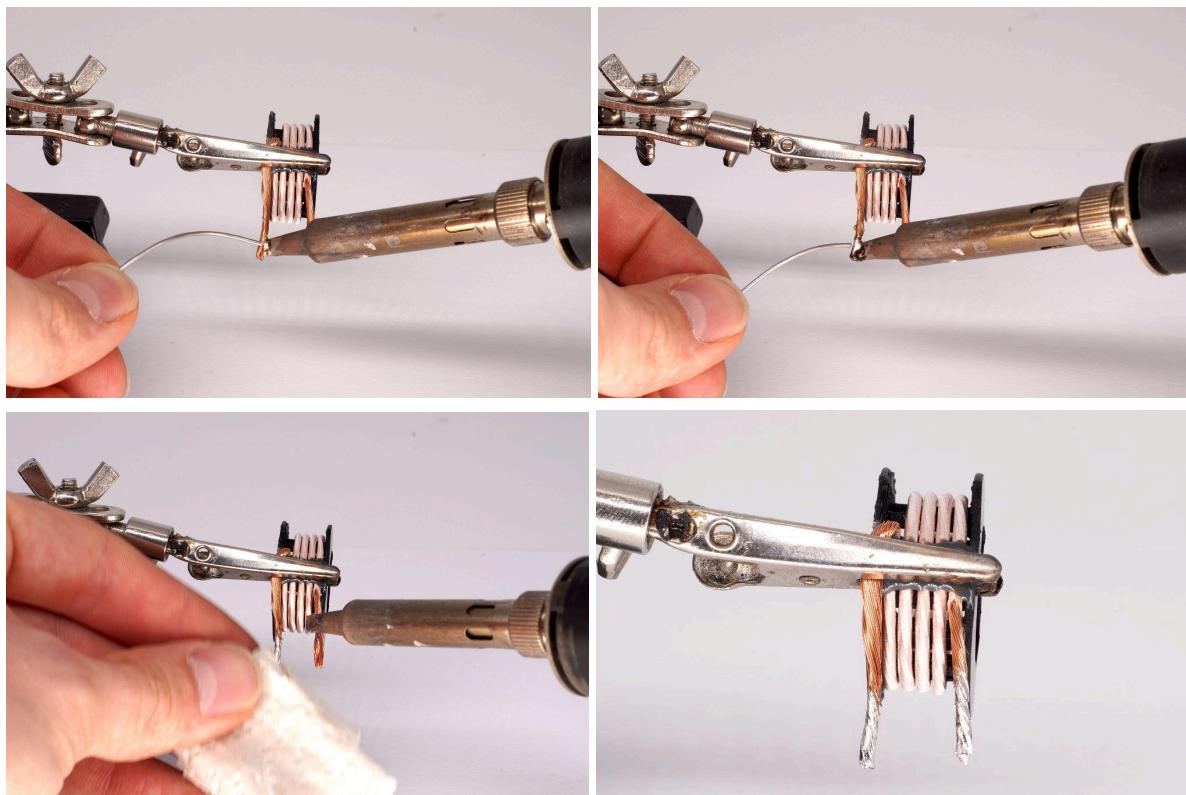
5.5 Verzinnen der Enden

Vor dem Verzinnen müssen die Enden der Wicklungen auf eine passende Länge gekürzt werden. Dazu empfiehlt es sich, den Transformator in eine Platine zu stecken und mit einem Seitenschneider die Enden auf einen Überstand von ca. 5 mm zu kürzen.



Hinweis: Das rechte Bild sowie nachfolgende zeigen eine ältere Variante des DCDCs.

Die Seidenumspinnung ist um ca. 10 mm an den Enden zu kürzen. Die Enden der Primärwindung sind mit Schrumpfschlauch zu isolieren. Andernfalls kann Schrumpfschlauch gegen Ausfransen genutzt werden. Das Verzinnen der Windungsenden kann bei 400 °C erfolgen, wobei zusätzliches Flussmittel hilfreich ist. Es ist darauf zu achten, dass möglichst alle Litzen verzинnt werden und sich keine größeren Rückstände des Schutzlacks an den Enden befinden. Das Reinigen der Enden erfolgt durch Abstreifen mit Küchenpapier. Im Ordner [transformer](#) befindet sich das passende Video [Transformer tinning.mp4](#).

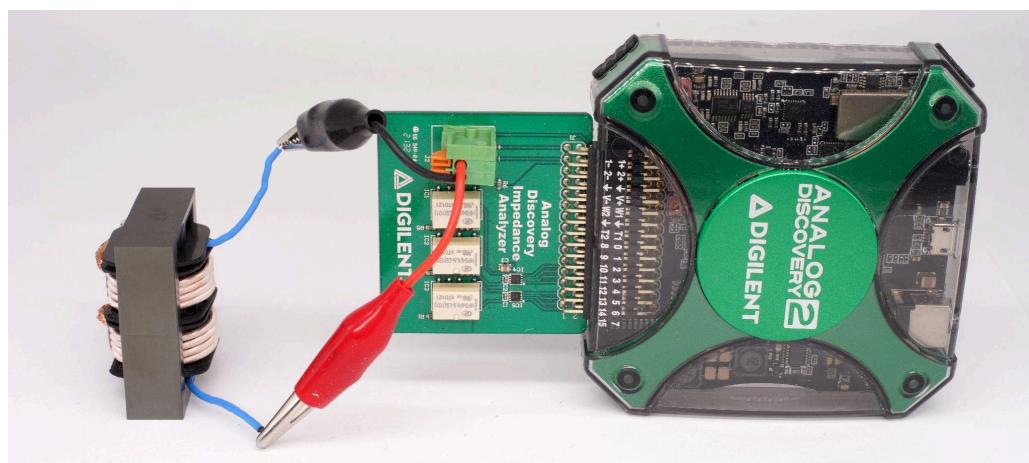




Im letzten Schritt werden die fertigen Wicklungen wie abgebildet auf die beiden Kernhälften gesteckt. Die Primärwicklung auf den N97 Kern, die Sekundärwicklungen auf den N27 Kern mit Luftspalt. Das Stecken sollte dabei ohne Krafteinwirkung möglich sein (siehe [Hinweise zum SLA-Druck](#)). Die äußeren Schenkel des Ferritkerns sind mit einer dünnen Schicht des 2K-Klebers zu bestreichen. Anschließend werden beide Hälften mit den Wicklungen zusammengebracht und unter leichter Krafteinwirkung durch eine Federklemme (mittelgroß, 4,5 cm Klemmöffnung) zusammengedrückt. Schraubzwingen sind nicht zulässig, da die Kraftwirkung schlecht einstellbar ist und zum Bruch der Kerne führen kann (durch den Luftspalt des Mittelschenkels ist keine Kraftableitung möglich). Dabei sollten die Kernhälften oben und unten möglichst bündig abschließen, wobei geringe Größenunterschiede üblich sind. Das Verkleben des Isolators mit den Kernhälften ist wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten nicht vorgesehen, da dies möglicherweise zu SpannungsrisSEN führt.

6 Vermessung des Transformators

Zum Vermessen Transformators wurde ein Analog Discovery 2 mit der Impedanz Analyzer Erweiterung verwendet. Ein gewöhnliches LRC-Meter reicht jedoch für den Nachbau aus.



Hinweis: Das Bild zeigt eine ältere Variante des DCDC Transformators.



Messung des frequenzabhängigen Widerstandes sowie Induktivität des Transformators.

Blau: Primärspule W1 Widerstand vs. Frequenz, Sekundärspulen offen

Grün: Primärspule W1 Widerstand vs. Frequenz, Sekundärspule W2 kurzgeschlossen

Lila: Primärspule W1 Widerstand vs. Frequenz, Sekundärspule W3 kurzgeschlossen

Rot: Kapazitätssmessung zwischen der Primärspule W1 und den Sekundärspulen W2+W3

Die folgenden Parameter wurden für den DCDCv9-3 Transformator bei einer Messfrequenz von 100 kHz ermittelt. Eine Messung zwischen 10 kHz und 300 kHz ist mit geringer Abweichung ebenso möglich. Die Induktivität und Streulinduktivität von W1 sollte nicht mehr als $\pm 5\%$ abweichen. Die Bezeichner W1, W2 und W3 stehen für die Primärwicklung sowie die beiden Sekundärwicklungen.

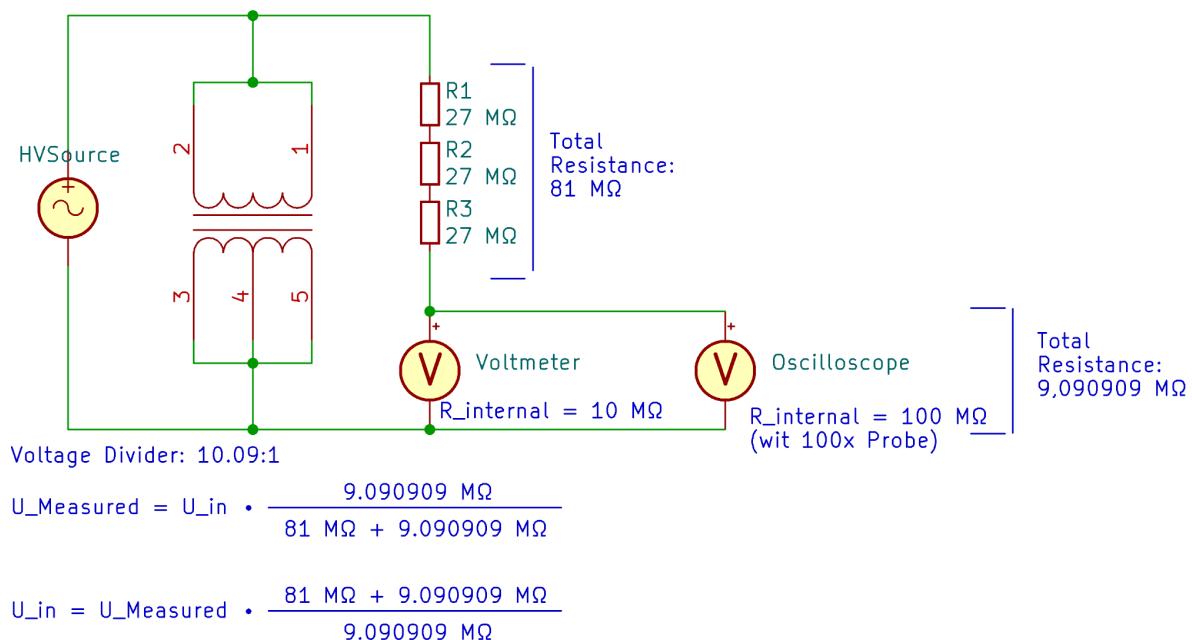
Modul	Parameter		Typ.	Einheit
Induktivität W1	100 kHz 4 Vpp sinus, AD2 Shunt = 10 Ω		166.3	μH
Streulinduktivität W1	100 kHz 4 Vpp sinus, AD2 Shunt = 10 Ω	W2 kurzschluss	56.32	μH
		W3 kurzschluss	56.11	μH
Induktivität	100 kHz 4 Vpp sinus AD2 Shunt = 10 Ω	W2 offen	1.057	μH
		W3 offen	1.014	μH
Streulinduktivität	100 kHz 4 Vpp sinus AD2 Shunt = 10 Ω	W2 offen, W1 kurzschluss	0.3557	μH
		W3 offen, W1 kurzschluss	0.3496	μH

Weitere Parameter wie Sättigungsstrom sind nur für die Entwicklung interessant und sollten beim Einhalten der obigen Parameter ebenfalls ähnlich ausfallen. Das Überprüfen dieser Werte kann entfallen.

6.1 Isolationsprüfung

Das Regelwerk der Formula Student schreibt eine Isolationsfestigkeit der dreifachen maximalen Akkuspannung als AC RMS Wert für eine Minute vor. In diesem Fall liegt die Akkuspannung bei maximal 600 V, daher muss die Isolationsspannung mindestens 1800 V AC RMS betragen. Die Regeln geben zwar keine Prüffrequenz vor, jedoch sind 50 Hz üblich. Alle verwendeten Widerstände sind Hochspannungswiderstände aus der GH 84-Reihe. Zur Messung der Hochspannung können beliebig passende Widerstände verwendet werden, insofern der Spannungsteiler die maximale Eingangsspannung des Voltmeters nicht überschreitet und der gesamte Spannungsteiler die Quelle nicht stark belastet.

Test Setup for Isolation Test (with Oscilloscope)



Die Durchschlagserkennung wurde sowohl mit einem Oszilloskop durch das Triggern auf kurze Spannungseinbrüche erfasst, als auch akustisch bzw. durch elektromagnetische Interferenz auf dem Mikrofon für die Videoaufnahme. Neben dem Isolationstest wurde eine weitere Aufnahme zum Nachweis der Funktionalität der verwendeten Messmittel erstellt. Die Videoaufnahmen dienen als Nachweis der bestandenen Isolationsprüfung und befinden sich in der [Scrutineering Support Präsentation](#).

Wurden alle Transformator-Tests bestanden, kann der Einbau als vorletztes Bauelement (C_{start1} als letztes) auf der PCB erfolgen. Die Befestigung des Transformators inkl. Isolator an der Platine erfolgt über dessen Anschlussleitungen. Auf einen möglichst geringen Spielraum zwischen Transformator und Platine ist zu achten. Die Befestigung gegen Vibratoren des Isolators auf der Platine ist bisher nicht vorgesehen, jedoch könnte es mittels doppelseitigen Klebeband oder flexilem Kleber erfolgen. Eine Verklebung sollte jedoch frühestens nach den Leistungstests erfolgen, da das Entfernen im Fehlerfall zur Beschädigung der Platine führen kann. Es ist aber vorstellbar, dass der Transformator selbst entfernbare bleibt, da dieser nur gesteckt in dem Isolator sitzt.

Es empfiehlt sich, eine Lage Kapton-Klebeband unter dem Isolator auf der Platine aufzubringen, um im Falle eines Bruchs des Isolators eine Isolation der Kernhälften zwischen HV und LV zu gewährleisten.

7 Löten der Bauelemente

Hinweis: Das Einfügen des Lithium-Kondensators erfolgt erst nach der Erstinbetriebnahme!

Für den folgenden Abschnitt empfiehlt es sich, die HTML-BOM (ibom) im Ordner [kicad/production](#) mit einem Browser zu öffnen. Je nachdem, ob eine unbestückte PCB oder PCB mit Assembly (PCBA) vorliegt, kann die entsprechend benannte iBom geöffnet werden.

7.1 Kabellose Aufsteckmontage

Sollte eine Montage des DCDCs auf einer Träger-Platine erfolgen, muss J5 auf der Rückseite installiert werden und J1 entfällt. J3, J6 und J7 werden als 2,54 mm Pin Header auf der Rückseite installiert. Die Länge der Pin Header ist mit dem Abstand bzw. den Abstandshaltern zur Platine darunter zu wählen. Freiliegende HV-Potentiale sind gegen unabsichtliches Berühren zu isolieren. Für die Positionen der Anschlüsse zur darunterliegenden Träger-Platine empfiehlt es sich, entweder die Maße in KiCAD (Layer User.Drawings) zu verwenden oder die Platine als Footprint in das Projekt der Träger-Platine zu importieren. *Ein Footprint wurde noch nicht erstellt. Datenspende möglich :)*

7.2 Reihenfolge

Der Autor empfiehlt, zuerst die Bauelemente auf der Rückseite zu löten. Es kann der Reihenfolge wie in der iBom (alphabetisch nach Referenzbezeichner) gefolgt werden. Anschließend sollten auf der Vorderseite zuerst die SMD Bauteile, dann die THT Bauteile der Höhe nach verlötet werden.

7.3 SMD-Bauteile

Sowohl klassisches Löten mit Lötzinn und Lötkolben als auch Arbeiten mit Lotpaste und Heißluft sowie Heizplatte oder Reflow-Ofen sind möglich. Einige Bauelemente lassen sich jedoch ohne Lotpaste und flächiger Wärmeeinwirkung kaum verlöten:

- Q8, Q9, Q10, Q11
- U3, U5, U8
- C34-37 müssen mit langsamer und flächiger Wärmeeinwirkung verlötet werden, da es sonst zu Rissen im Dielektrikum kommen kann:

[Cracking Problems in Low-Voltage Chip Ceramic Capacitors](#)

Das Nutzen einer Heizplatte beim Löten mit Heißluft kann helfen, große SMD-Bauteile oder Pads mit starker thermischer Leitfähigkeit erfolgreich zu verlöten. Zusätzliches Flussmittel wird sowohl bei Lotpaste als auch bei bleifreiem Lötzinn empfohlen.

Bei manueller Bestückung hilft ein Stencil, die Lotpaste sauber aufzutragen. Mit einer feinen Spritze für die Lotpaste kann bei geübten Umgang auch mein gutes Ergebnis ohne Stencil erzielt werden.

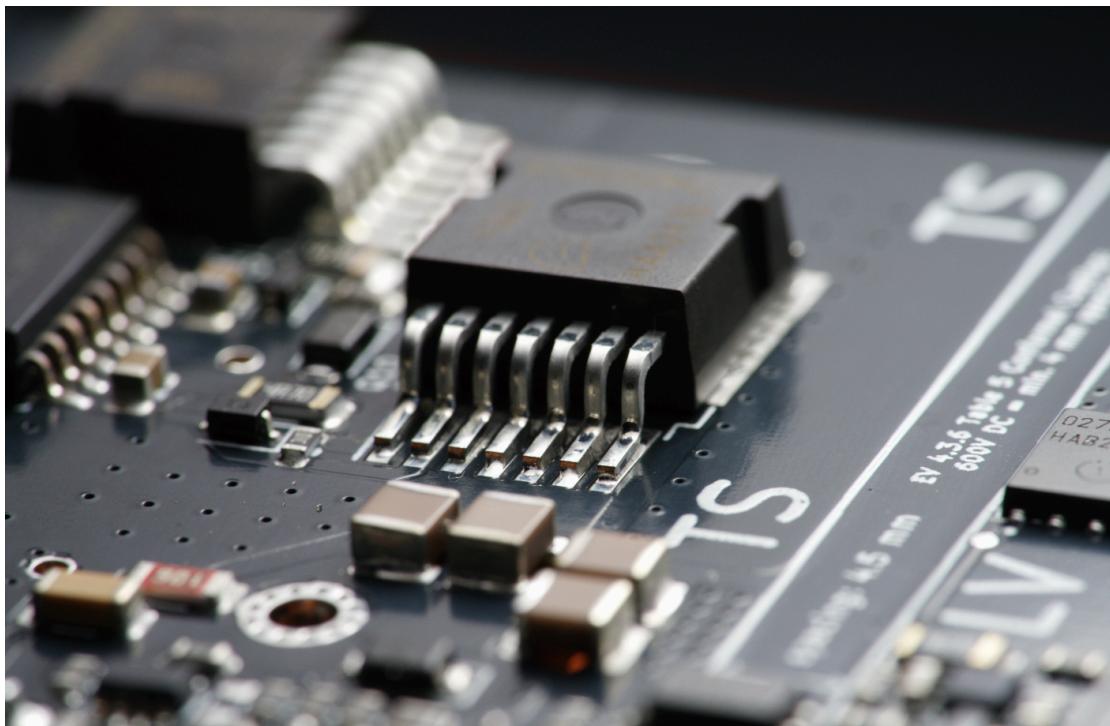
7.4 THT Bauteile

- F1 ist die Sicherung selbst. Eingelötet werden F1.1 und F1.2 (Sicherungsklemmen)

- XT60 Stecker (J5): Mit großer Lötpitze für max. 5-10 sek. bei 400 - 450 °C verlöten. Bei geringerer Temperatur dauert es sonst zu lange, sodass der Stecker anfängt, sich zu verformen.
- C11, C13 bei 400 - 450 °C für 2-5 sek.
- T1 (insbesondere die Sekundärwicklungen) benötigen 400 - 450 °C und Lötzeiten von 10-20 sek.

7.5 Reinigung

Nach dem Löten können Flussmittlerückstände mit einer weichen Bürste und Isopropanol entfernt werden. Der Autor weist darauf hin, dass die Nutzung von Ultraschallreinigern empfindliche Bauteile wie Keramikkondensatoren beschädigen kann und daher die Nutzung auf eigene Gefahr erfolgt. Bei bisherigen Konvertern im genutzten Reiniger des Autors konnte keine Beschädigung festgestellt werden. Die Reinigung kann hierbei mittels PCB-Cleaner erfolgen. Eine Nutzung von Isopropanol im Ultraschallreiniger ist je nach Hersteller nicht zulässig aufgrund der Brandgefahr. Sollte dennoch Isopropanol verwendet werden, geschieht dies auch auf eigene Gefahr. Die HV-Sicherung ist vor dem Eintauchen zu entfernen. Nach der Reinigung ist eine gründliche Trocknung in einem geeigneten Ofen (oder zur Not auch auf einer isolierten Druckplatte eines 3D-Druckers) notwendig. Eine Temperatur von 70 °C bei 2 Stunden Trocknungsduer kann genutzt werden. Die ausreichende Belüftung der Heizkammer ist zu gewährleisten, um Ansammlungen von explosiven Gasen oder Feuchtigkeit zu verhindern.



Lötergebnis mit manuell aufgetragener Lotpaste nach Reinigung

Im letzten Schritt ist die PCB optisch (Vergrößerungsglas empfohlen) auf Lötbrücken, Zinnkugeln und adäquate Lotmengen sowie ein wohlgeformter Meniskus an den Anschlüssen der Komponenten zu prüfen und Fehlstellen zu beheben. Dabei können ergänzend Fotos zur eigenen Dokumentation angefertigt werden. Bei bleifreien Loten ist das Fehlen einer glänzenden Oberfläche kein eindeutiges Kriterium für eine kalte Lötstelle.

7.6 Conformal Coating

Um die Isolationsanforderungen des Formula Student Regelwerkes zu erfüllen (EV 4.3.6) ist es notwendig, den Konverter mit einem Isolationslack zu überziehen. Hierfür wurde "Plastik 70 Super" verwendet. Aus der Gebrauchsanweisung des Herstellers ist zu entnehmen:

- Sprühabstand: 20 bis 30 cm
- Oberflächen sollen frei von Fett, Flussmittel und Schmutz sein
- Nach dem Auftragen durch Leersprühen (überkopf) die Sprühdüse reinigen
- berühr trocken nach ca. 20 min

Vor dem Aufbringen des Isolationslacks sind alle Anschlussstrecken (HV-Input, LV-Output, Lüfteranschluss J2, J8) und die Potentiometer RV1 und RV2 sowie F1 und F3 abzukleben (F2 ist ok mit Coating). Es empfiehlt sich, mit einem Drahthaken den Konverter an einem der vier Befestigungslöcher aufzuhängen und den Schutzlack von allen Seiten gründlich aufzubringen, sodass er abtropft.

Es wird vermutet, dass der Schutzlack auf die Wärmeabgabe einen geringfügigen negativen Einfluss haben könnte. Nach Interpretation der FS-Regeln (Rules 2025 v1.0 EV 4.3.6) wäre es nur erforderlich, den Bereich zwischen TS und LV mit Schutzlack zu versehen, sodass wärmeabstrahlende Komponenten frei bleiben könnten. Diese Maßnahme ist aber eher als letztes Mittel zu bewerten und stattdessen zusätzliche Lüfter zu installieren. Der Schutzlack ist durchlötbare und kann mit Isopropanol entfernt werden.

7.7 Lüfter und Temperatursensor

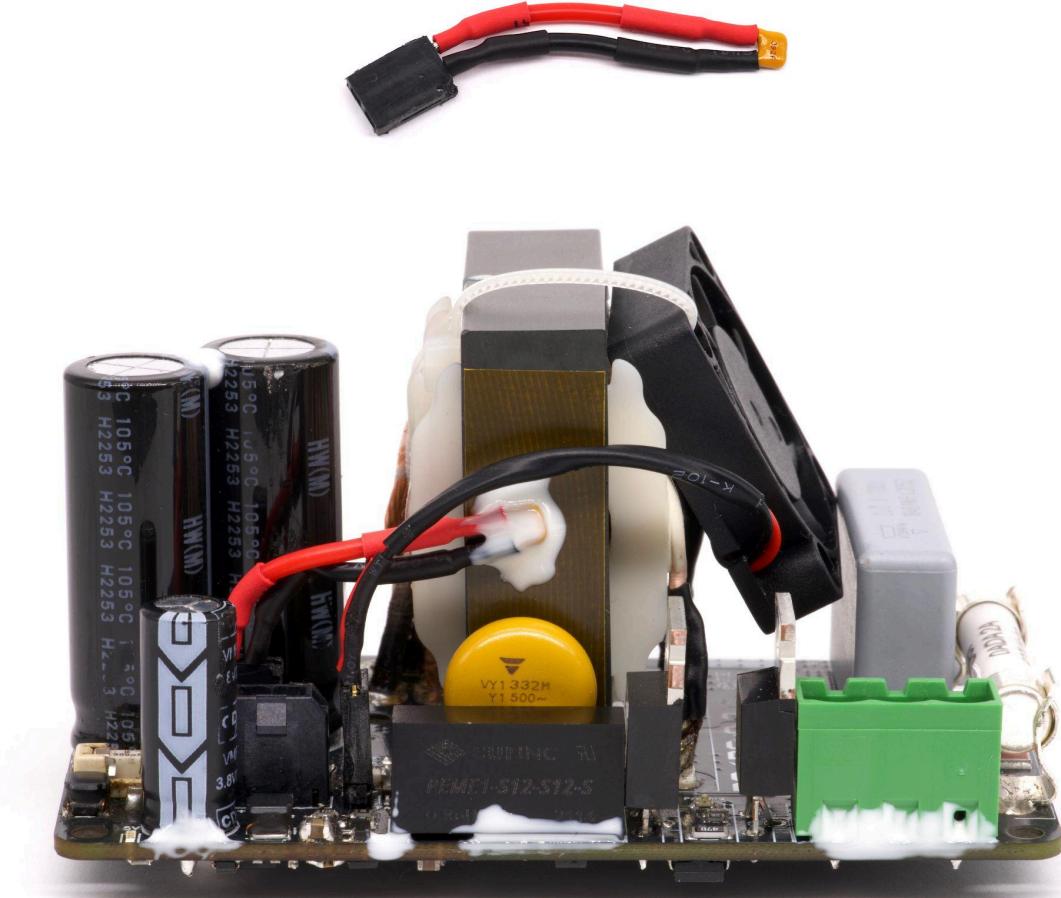
Als Lüfter wurde ein Modell mit den Maßen 30 x 30 x 8 mm und 5 V Nennspannung verwendet (siehe Bauteilliste). Die Versorgungsspannung kann mittels Löt-Jumper (JP1) auf der Rückseite zwischen 3,7 V und 12 V gewählt werden. Dazu wird mit genügend Zinn zwischen dem mittleren Pad und dem der Spannung entsprechenden (siehe Beschriftung) äußeren Pad eine Verbindung hergestellt. Es dürfen auf keinen Fall alle drei Pads miteinander verbunden sein!

Die Anschlusskabel des Lüfters wurden auf eine Länge von ca. 50 - 60 mm gekürzt und mit Schrumpfschlauch eingeschrumpft, da weder Isolationsspannung noch Temperatur-Rating bekannt sind. Die Kabel können anschließend entweder direkt in die Pads von J2 eingelötet oder mit 2,54 mm Pin-Header (Male + Female) als steckbare Verbindung ausgeführt werden



Der Aufkleber mit der Typenbezeichnung auf dem Lüfter ist zu entfernen und mit einem runden Stück Kapton zur Isolation zu bekleben. Der Lüfter kann anschließend mit einem kleinen Kabelbinder in Auslassrichtung am oberen Schenkel des Transformatoren auf der HV-Seite befestigt werden (siehe nächste Seite).

Da die Anschlussbeine des Temperatursensors TH1 zu kurz und nicht isoliert sind, werden sie auf ca. 5 mm gekürzt mit ca. 35 mm Anschlusskabel verlötet. Sie können anschließend entweder direkt in die Pads von J8 eingelötet oder mit 2,54 mm Pin-Header (Male + Female) als steckbare Verbindung ausgeführt werden. Der Temperatursensor besitzt keine Polarität und wird auf einer Lage Kapton auf der Seite des Transformator-Kerns mit geeignetem 2K Kleber befestigt.



7.8 Diverses

Einige Bauteile sind während der Verwendung im Formula-Student Fahrzeug anfälliger für Vibrationen aufgrund ihrer Bauform und Montage. Nachfolgende Bauteile können mit etwas 2K-Kleber gegen Vibrationen verstärkt werden:

- C_{start1} an der PCB
- J1 an der PCB
- U1 an der PCB
- C11 und C13 miteinander am oberen Ende

Zum anschalten des DCDCs im Testbetrieb kann ein kurzer Enable-Schalter mit Molex Microfit-Stecker verwendet werden:



Der HV-Anschlussstecker kann in gewinkelte ([284051-2](#)) oder gerader Ausführung ([282809-2](#)) verwendet werden.

8 Testen des Konverters

8.1 Erstinbetriebnahme

Es sind nun alle Bauelemente außer C_{start1} , verlötet.

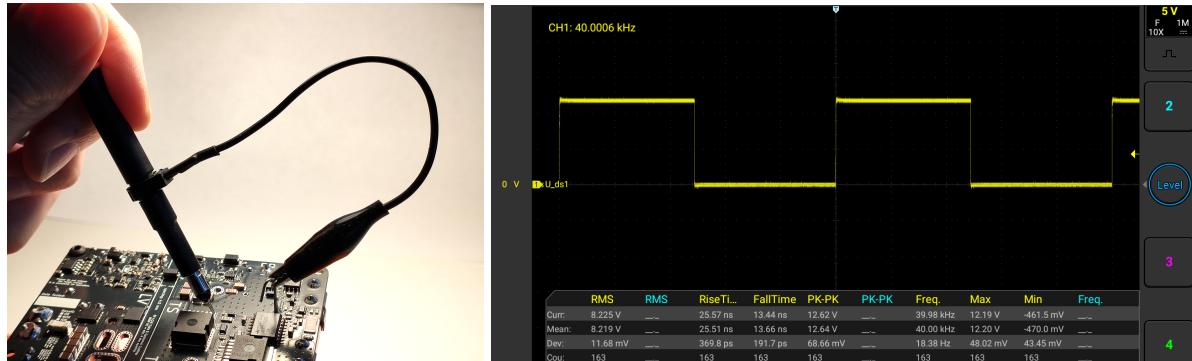
Es muss geprüft werden:

- Sind HB und SR-FETs zwischen Drain-Source und Gate-Source hochohmig (Widerstandsmessung mit Multimeter, Widerstand sollte im $M\Omega$ -Bereich liegen)?
→ Falls nicht, ist vermutlich eine Zinnbrücke zwischen Kontakten vorhanden oder ggf. am Treiber.
→ Neu Verlöten mit reichlich Flussmittel, ggf. überschüssiges Lot entfernen.
- Hinweis: U5 und U8 haben zwei Orientierungspunkte, sodass man die Ausrichtung leicht verwechselt.

8.2 Initial Test (ohne HV an Input)

- Am Labornetzteil (Output OFF) einen Konstantstrom von 100 mA und 0 V einstellen
→ mit dem Output des DCDCs mit gleicher Polarität verbinden
- Am Labornetzteil (Output ON) die Spannung langsam erhöhen auf 23 V
→ Es sollte an den Pads von C_{start1} eine Spannung zwischen 3,6 und 3,8 V anliegen und die 5 V LED leuchten.
- Mit einem Enable-Schalter den DCDC einschalten.
→ Es sollten ca. 12 bis 12,5 V zwischen den Pads 1 und 2 von U1 anliegen und die 12 V sowie Pwr LED leuchten. Der Input Strom bei 23 V sollte zwischen 20 und 30 mA liegen
- Einfügen des Lithium-Kondensators: Beim Einfügen ist besondere Vorsicht geboten, da der Kondensator (C_{start1}) zwischen 2,5 V und 3,8 V geladen ist. **AUF KEINEN FALL BEIDE KONTAKTE BEIM KÜRZEN DER ANSCHLÜSSE KURZSCHLIEßen!**
- R61 entfernen, um UVP/OVP zu deaktivieren (wichtig für erste Tests)
- Hinweis: Für HS-Messungen wird als Massepunkt C1 Pin 1 empfohlen (hier einen kleinen Draht o. Ä. Anlöten).
- Prüfen, ob Rechteckförmige Signale anliegen an jeweils gemessen gegen Masse:
 - U12 Pins 5 und 8
 - Q10 und Q11 Pin 1 (Gate)

Hinweis: Der Ausgang darf beim Testen nicht über 23 V liegen, da der Regelkreis sonst U12 abschaltet, wenn er über der eingestellten Ausgangsspannung liegt (das ist notwendig). Aufgrund von Toleranzen kann der Sollwert etwas unter 24 V liegen.



Beispielmessung am Gate von Q10. Die Frequenz kann je nach Einstellung von RV2 anders sein.

→ Es kann nun eine geringe Spannung (z.B. 10 V / 100 mA) an den HV-Input angelegt werden. Zwischen T1 Pin 1 und C1 Pin 1 sollte nun ein Rechteck mit der angelegten Spannung anliegen.

Sind diese Tests erfolgreich, können erste Einstellungen vorgenommen werden.

8.3 Fehlersuche

Bei Problemen kann die nachfolgende Tabelle als Hilfestellung dienen.

Fehler	Ursache	Lösung
DCDC lässt sich nicht einschalten, keine LEDs leuchten	Start-Kondensator entladen. Spannung der Enable-Zuleitung gegen Masse messen. Muss > 2.5 V sein. Ggf. Boost-Converter kaputt	Durch Anlegen einer Spannung zwischen 5V und 24V an LV-Out kann der Start-Kondensator über den internen Buck-Converter nachgeladen werden. Ggf. Boost-Converter IC tauschen
DCDC lässt sich nicht einschalten, 5V LED leuchtet nicht beim Nachladen über Output	LV-Sicherung Prüfen, eventuell Buck-Converter überlastet gewesen oder kaputt.	Sicherung und/oder Buck-Converter IC tauschen
Precharge LED dauerhaft an	Zwischenkreis wird dauerhaft entladen oder Precharge defekt. Widerstandsmessung von Bauteilen im Zwischenkreis (z.B. Halbbrücken FETs) durchführen.	ggf. Halbbrücken FETs oder Precharge FETs/OPV/R6 tauschen
Orangene HV LED leuchtet nicht	Widerstand R6 auf korrekten Wert prüfen.	
Orangene HV LED leuchtet dauerhaft, auch wenn Enable = OFF		
PWR LED leuchtet nicht	Precharge nicht abgeschlossen oder Überlast der 12V Versorgung nach D11. Möglicherweise ist auch der Enable-Schalter und dessen Leitungen oder Kontakte zum Konverter zu hochohmig ($>0,5 \Omega$). Nachmessen!	ggf. Halbbrücken FETs oder Precharge FETs/OPV/R6 tauschen. Prüfen und ersetzen von Steckern, Kabel oder dem Enable-Schalter.
D3 leuchtet nicht	HV Eingangsspannung unterhalb des UVP-Schwellwerts oder HV-Sicherung defekt	Spannung über den UVP-Schwellwert erhöhen. ggf. UVP-Schwellenwert

		anpassen. ggf. HV-Sicherung tauschen
LEDs Leuchten normal, aber Keine Spannung am Ausgang	Überlast am Ausgang	Output-Sicherung tauschen
Nur 12V LED leuchtet	Übertemperaturschutz aktiv	10 Sekunden abkühlen lassen. Ist ein Neustart nicht möglich, liegt der Fehler woanders.
Ausgangsspannung oszilliert im unteren Hz-Bereich	Überstromschutz aktiv. Möglicherweise Verbraucher zu früh zugeschaltet.	Den Konverter sofort abschalten und die Verbraucher auf hohe Ströme prüfen!
Kein Ausgangssignal an U11 oder U12 während Tests	Wird der Ausgang zu Testzwecken mit 24 V gespeist, schaltet der Regelkreis U12 ab, wenn er über der eingestellten Ausgangsspannung liegt (das ist notwendig). Aufgrund von Toleranzen kann der Sollwert etwas unter 24 V liegen.	Verringern der eingespeisten Spannung am Ausgang auf mindestens 23 V. Wenn mit einer benutzerdefinierten Ausgangsspannung (z. B. 12 V) gearbeitet wird, unterhalb dieser bleiben.
Primärstrom nicht symmetrisch und/oder piepen und heiße SR-FETs ohne Last bzw. SR-FETs schalten nicht korrekt.	Möglicherweise ist eine der beiden Sekundärspulen falsch herum angeschlossen oder versehentlich eine Wicklung kurzgeschlossen (beide Anschlüsse in Pin 4). Prüfen, dass die Wicklungen von der Mittelanzapfung (Pin 4) aus betrachtet einen entgegengesetzten Wicklungssinn haben bzw. entgegengesetzte Spannungen erzeugen.	Anschlüsse einer Sekundärwicklung vertauschen.

Sollte bei einem Problem keiner der genannten Fehler zutreffen, bittet der Autor, ein [Issue](#) auf GitHub zu erstellen, um die Liste zu erweitern. Zufällige Probleme, die auf z. B. Lötfehler zurückzuführen sind, werden nicht aufgeführt. Viele Fehler lassen sich durch Messungen mit einem Multimeter oder einem Oszilloskop finden. Eine Wärmebildkamera wird unterstützend zur schnellen Fehlersuche empfohlen.

8.4 Test Set-up

Der nachfolgende Messaufbau wird für zahlreiche Messungen verwendet.

Am HV-Input:

- Spannungsquelle 0 - 600 V / 0 - 2 A
- Multimeter für Spannungsmessung
- Multimeter für Strommessung

→ Die Multimeter werden spannungsrichtig angeschlossen, also Spannungsmessung hinter dem Strommesser, dann der DCDC.

Am LV-Output:

- Leistungssenke 24 V / max. 0 - 31,25 A
- Multimeter für Spannungsmessung (verbunden über die Messpunkte J4)
- Multimeter für Strommessung (oder Messung des Stroms über einen geeigneten Shunt)
- Labornetzteil zum Aufladen des Start-Kondensators (5-24V geeignet)

Auf dem DCDC mit Oszilloskop:

- A) Spannungsmessung über C_{res} (HV! Nur geeignet, wenn differenzielle HV-Proben bis 600 V vorhanden sind oder Oszilloskop isolierte Messeingänge besitzt)
- B) Strommessung (isiolerte Strommessspule) über einen Leiter des Transformators.

Die Messwerte beider Messverfahren (A/B) können näherungsweise ineinander umgerechnet werden, daher muss nicht beides gemessen werden. Gegebenenfalls ist die Strommessung aber besser geeignet, um die tatsächliche Belastung des Transformators zu verstehen.

- Spannungsmessung über Drain-Source und Gate-Source an einem der SR-MOSFETs (Q8 oder Q9)
- Messungen über C1 (HV!) zur Kontrolle des Precharge
- HV-Input und LV-Output für Rippelspannungsmessungen

Für alle Oszilloskop-Messungen sind die Messverfahren A oder B immer relevant, da hierüber auch die Schaltfrequenz ermittelt werden kann. Bei einem Mehrkanal-Oszilloskop können selbstverständlich auch mehrere Messungen gleichzeitig durchgeführt werden. Es ist allerdings immer auf die vorhandenen Potenzialunterschiede und ausreichende Isolation zu achten. Außerdem können je nach Messung Signale einer Messung andere Messungen stören. Im Zweifel sollte daher lieber nur eine Oszilloskop-Messung gleichzeitig ausgeführt werden.

Andere Messungen:

- Raumtemperatur (bei Isolationsmessung auch Luftfeuchtigkeit)
- Wärmebildkamera (sehr zu empfehlen!), alternativ: IR-Thermometer (viel ungenauer, misst nicht auf den Punkt genau, Reflektionen nicht erkennbar!)

8.5 Allgemeine Hinweise zu den Messungen/Tests

- immer erst mit wenig Belastung testen und langsam hocharbeiten (wenig Spannung, wenig Leistung → Leistung erhöhen, Spannung erhöhen)
- Wenn Probleme bei geringer Belastung auftreten, nach Möglichkeit frühzeitig beheben, da sie bei hoher Belastung wesentlich stärkere Ausmaße haben können (z.B. Verlustleistung) und zur frühzeitigen Zerstörung von Komponenten führen können
- Bei Tests, die das Risiko der Zerstörung von Komponenten bergen, möglichst spät ausführen, um den Großteil der relevanten Tests abzudecken
- Thermisches Gleichgewicht: Der Converter wird nach dem Start ca. 10 Minuten ohne Last warm laufen gelassen. Besonders der Transformator verringert seine Verluste beim Erwärmen. Nach einer Änderung (≤ 100 W) der Ausgangslast sollte 30-120 Sekunden gewartet werden, bis die Messwerte und Temperaturen konstant sind. Ein Strommessgerät am Eingang mit Zeitverlauf hilft, eine konstante Stromaufnahme schneller zu erkennen. Bei großen Laständerung (Volllast → Leerlauf) sollte mindestens 5 Minuten gewartet werden.

8.6 Messliste

Die nachfolgende Tabelle inkl. Erklärungen steht in der [DCDCv9-3 Table](#) in dem Tabellenblatt Measurements Table example zur Verfügung. Sie enthält alle wichtigen Werte, die während einer Messung z. B. Resonanztest oder Leistungstest erfasst werden sollten.

Title:	Test No.	Date	Transformer	Core Material	C_res [nF]	HB MOS R_Gate	Air Gap μm	SR_R_gate	SR_fet	Roomte mp	Fan	C_Load		R41	R39	C30	R37	C26	C29	R38/29 min. Ton		33 min							
Initial Test v9-3	300	8.11.24	67+68+69	N97+N27_1AG	4 x 5.6 nF COG	4R7	1000,0	4R7	BSC027 N06LSSA TMA1	21,1°C	no	4400 uF + 1410 μF (DPS5020)		1k	1k	10 nF	47k	22 nF	47 pF	1k	10k								
comments	F min kHz	LV set V	Deadtime °	HV_IN V	HV_IN mA	LV_OUT V	SHUNT mV	F_sw kHz	I_prim mA RMS	U_RMS Cr_B meas	U_RMS Cr calc	LV OUT mA	HV IN P W	LV OUT P W	Powe r loss W	Effici ency	Gain 28:2	Temp after min	HS FET	LS FET	C_re s (COG)	outer Rect FET	inner Rect FET	Trafo prim	Trafo Sec	Trafo Core	snub max. Temp	Neutral suface	
f_res, OCP, R60 100k / C44 22 nF response Value: 132,4 Vrms / 652,4 Vpp	80,2	24,1	135°	5,36	1098	18,5	0	80,2	2490	212,8	220,5	5,617	5,89	0,10	5,78	1,77 %	96,64												
	83	24,1	135°	35,03	217	21	0	83,0	2739	224,8	234,4	5,617	7,60	0,12	7,48	1,55 %	16,79	2	46	46	49	34	37	58	42	60	43	22,4	
	80,2	24,1	135°	42,04	180	21,41	0	83,5	2785	230,4	236,9	5,617	7,57	0,12	7,45	1,59 %	14,26												
f_res, R60 82k → no OCP triggered	80,2	24,1	135°	6,465	1210	22,7	0	80,3	3007	254,7	266,0	5,617	7,82	0,13	7,70	1,63 %	98,31	3	51	50	56	41	44	71	47	70	47	25	
	80,2	24,1	135°	5,858	1288	22,7	0	79,9	3045	259,1	270,7	5,617	7,55	0,13	7,42	1,69 %	108,50												
	81,7	24,1	135°	49,99	245	24,1	0	83,6	3099	259,0	263,4	5,617	12,25	0,14	12,11	1,11 %	13,50	5	47	47	49	32	35	58	41	58		22,6	
Oszi Ripple Measurement: 1,140 Vrms, 3,14 Vpp (ringing ignored), ringing on current: 10 MHz, dead time has no influence	81,7	24,1	135°	50,06	190	24,1	0	83,5	3099	358,9	263,7	5,617	9,51	0,14	9,38	1,42 %	13,48												
	81,7	24,1	135°	50,036	230	24,1	0,24	83,5	3100	262,1	263,9	103,166	11,51	2,49	9,02	21,60 %	13,49												
	81,7	24,1	135°	49,983	257	24,1	0,37	83,5	3130	263,2	266,5	156,004	12,85	3,76	9,09	29,27 %	13,50												
slight whine (rk)	81,7	24,1	135°	49,84	335	24,1	0,77	83,5	3130	262,2	266,5	318,576	16,70	7,68	9,02	45,98 %	13,54												
more whine (rk)	81,7	24,1	135°	49,63	471	24,1	1,45	83,4	3130	262,9	266,6	594,931	23,38	14,34	9,04	61,34 %	13,60	2	59	59	64	45	51	85	55	83	52	24	
slight whine (rk)	81,7	24,1	135°	49,41	758	24,1	2,81	83,1	3246	273,5	277,6	1147,569	37,45	27,66	9,80	73,84 %	13,66	2	60	61	63	51	57	87	59	87	56	24	
silence, ripple: 0,94 Vrms	81,7	24,1	135°	49,34	1024	24,1	4,17	83,0	3278	276,3	280,7	1700,113	50,52	40,97	9,55	81,10 %	13,68												
OVL, ripple: 0,673 Vrms	81,7	24,1	135°	49,32	1057	14,81	7,7	81,7	2395	201,1	208,4	3133,851	52,13	46,41	5,72	89,03 %	8,41	5	55	55	60	54	61	73	58	72	58	23,8	

8.7 Checkliste

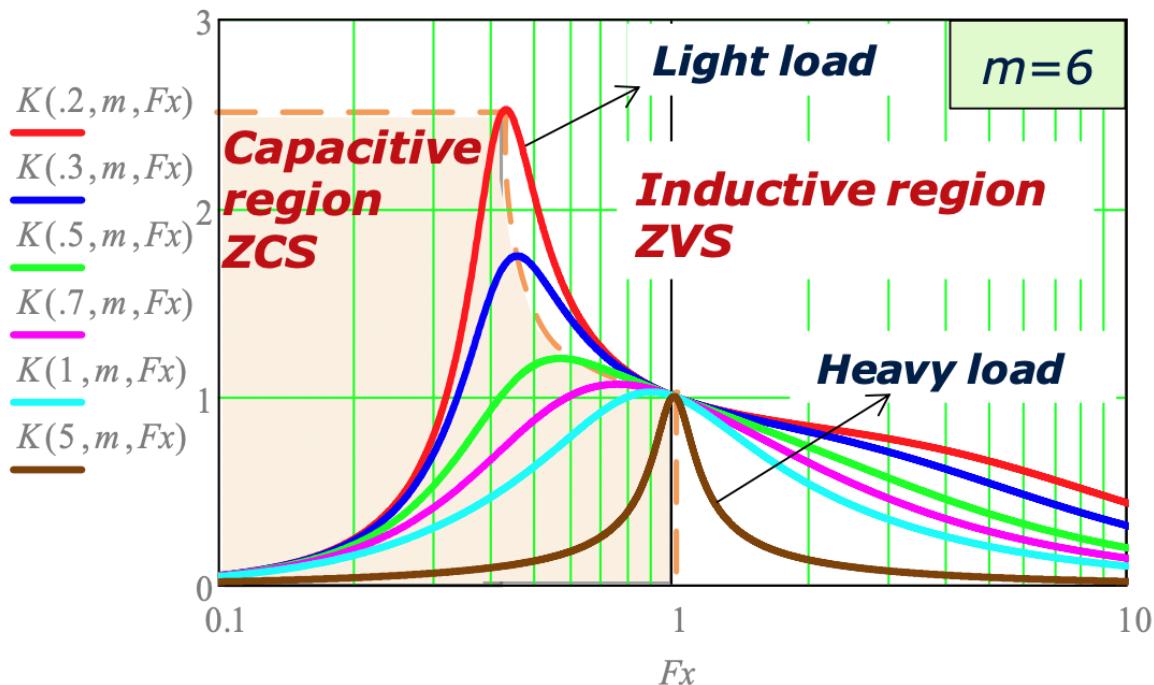
Die nachfolgende Liste enthält alle wichtigen Messwerte, die für jeden Nachbau ermittelt werden müssen. Die Liste befindet sich auch in der [DCDCv9-3 Table](#) in dem Tabellenblatt essential Checklist empty und kann mit dem Tabellenblatt essential Checklist verglichen werden. Sollten größere Abweichungen festgestellt werden, ist der Nachbau auf Fehler zu prüfen.

Module	Parameter	Value	Unit	Date	Status
Start-up Cap Supply	Charging Voltage (with C_{start1}), DCDC = Disabled		V		<input type="checkbox"/>
Start-up Cap Supply	Input current with fully charged capacitor, 24V _{in} , Enabled		mA		<input type="checkbox"/>
Start-up Cap Supply	Discharge Current (DCDC = Enabled) no HV, Cap @ 3,75 V		mA		<input type="checkbox"/>
Start-up Cap Supply	Discharge Current (DCDC = Enabled) 600 V		mA		<input type="checkbox"/>
Start-up Cap Supply	Hold-Up time, DCDC = Enabled, no HV,		s		<input type="checkbox"/>
LV Voltage LV Side Voltage	$U_{in} = 0$ V, DCDC = Enabled, IDLE, 12.2 V		V		<input type="checkbox"/>
LV Voltage 9 V LDO	$U_{in} = 0$ V, DCDC = Enabled, IDLE, 12.2 V, 20,1°C RT		V		<input type="checkbox"/>
LV Voltage, HV Side	$U_{in} = 0$ V, DCDC = Enabled, IDLE, 12.2 V		V		<input type="checkbox"/>
LV Voltage, HV Side after D11	$U_{in} = 0$ V, DCDC = Enabled, IDLE, 12.2 V		V		<input type="checkbox"/>
LV Voltage, HV Side after D14	$U_{in} = 0$ V, DCDC = Enabled, IDLE, 12.2 V		V		<input type="checkbox"/>
Input Current, Turned ON, above UVP	400 V, 21°C RT, no Fan, dead time = 80°		mA		<input type="checkbox"/>
Input Current, Turned ON, above UVP	500 V, 21°C RT, no Fan, dead time = 80°		mA		<input type="checkbox"/>
Input Current, Turned ON, above UVP	600 V, 21°C RT, no Fan, dead time = 80°		mA		<input type="checkbox"/>
Oscillator	Soft Startup with C34 = 22uF/1k frequency		kHz		<input type="checkbox"/>
Oscillator	frequency min. recommended		kHz		<input type="checkbox"/>
Voltage Regulation	output Voltage, 25°C RT		V		<input type="checkbox"/>
Voltage Regulation	minimum HV input for 24 V Output, set by $f_{min} = 94$ kHz		V		<input type="checkbox"/>
UVP	enable, 1.7 MΩ		V		<input type="checkbox"/>
UVP	disable, 1.7 MΩ		V		<input type="checkbox"/>
OVP	enable, 543 kΩ		V		<input type="checkbox"/>
OVP	disable, 543 kΩ		V		<input type="checkbox"/>

Module	Parameter	Value	Unit	Date	Status
Overtemperature enable	U6 = TL072 R35 = 330 kΩ, R36 = 4.7 kΩ C28 = 100 nF, C48 = 10 nF		°C		<input type="checkbox"/>
Overtemperature disable	U6 = TL072 R35 = 330 kΩ, R36 = 4.7 kΩ C28 = 100 nF, C48 = 10 nF		°C		<input type="checkbox"/>
Fan control turn-on	U6 = TL072 R31 = 4.7 kΩ, R18 = 470 kΩ		°C		<input type="checkbox"/>
Fan control turn-off	U6 = TL072 R31 = 4.7 kΩ, R18 = 470 kΩ		°C		<input type="checkbox"/>
Fan control Sensor Loss	Fan behavior				<input type="checkbox"/>
Hotbox Test, SR Temperature after 30 min	converter inside a box with $T_{amb} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ must be able to deliver $P_{out} = 500 \text{ W}$ at $V_{in} = 500 \text{ V}$ for 30 minutes, restarted after 5 seconds must be possible		°C		<input type="checkbox"/>
Inductance W1	100 kHz 4 Vpp sine, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Leakage Inductance W1	W2 short, 100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Leakage Inductance W1	W3 short, 100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Inductance W2	100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Inductance W3	100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Leakage Inductance W2	100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Leakage Inductance W3	100 kHz 4 Vpp Sine, AD2 = 10 Ω, N27+N97		µH		<input type="checkbox"/>
Isolation	1 minute AC, 50 Hz, no Isolation breakdown		V _{RMS}		<input type="checkbox"/>

8.8 Minimale Schaltfrequenz (Fmin bzw. Poti RV2)

Die Schaltfrequenz muss immer über der Resonanzfrequenz liegen, um nicht im kapazitiven Bereich zu arbeiten (Schaltverluste durch hartes Schalten). Wie man an der nachfolgenden Grafik sieht, ist die Grenze (orange gestrichelte Linie) lastabhängig. Für die ersten Tests kann aber F_{\min} ohne Last eingestellt werden.



Gain vs. Schaltfrequenz, [Infineon Design Note AN 2013-03](#), Seite 6, V1.0 March. 2013

Vorsicht! Trotz der geringen Eingangsspannung können aufgrund des Schwingkreises bereits über 300 V über dem Transformator und C_{res} anliegen! Der Transformator kann dabei über 60 °C heiß werden. Der Abgleichschraubendreher ist isoliert auszuführen! Sollte eine Ausgangsspannung über 25 V erreicht werden, liegt ein Fehler im Regelkreis vor und muss vor weiteren Tests behoben werden! Ist ein "Klacken" mehrfach pro Sekunde zu hören, liegt ein Überstrom im Schwingkreis vor. Die Eingangsspannung muss verringert werden!

Um F_{\min} einzustellen, ist zuerst die Resonanzfrequenz des Schwingkreises zu bestimmen. Dazu werden 5 V bis 15 V mit einem 1,5 A Stromlimit an den HV-Eingang angeschlossen und mit einem Abgleichschraubendreher der Poti F_{\min} (RV2) so eingestellt, dass die Spannung am Ausgang maximal wird.

Wird am Ausgang 24 V erreicht, muss die Eingangsspannung verringert werden, sodass die Ausgangsspannung unter 24 V liegt, z.B. 20 V damit der Regelkreis ab 24 V nicht eingreift. Danach muss F_{\min} erneut so eingestellt werden, dass die Ausgangsspannung maximal wird, aber unter der Regelspannung (24 V) liegt. Dieser Vorgang ist solange zu wiederholen, bis die Frequenz mit der maximalen Ausgangsspannung bei minimaler Eingangsspannung gefunden wurde (Resonanzfrequenz ohne Last). Anschließend sollten alle Messwerte (Ströme, Spannungen, Schaltfrequenz) in die Messtabelle eingetragen werden. Bei dem Aufbau des Autors lag die Resonanzfrequenz bei 80,2 kHz.

Ist die Messung der Resonanzfrequenz abgeschlossen, muss F_{min} vorübergehend so eingestellt werden, dass sie ca. 5 kHz über der Resonanzfrequenz liegt. Die Drehung des Pots gegen den Uhrzeigersinn erhöht die minimale Schaltfrequenz.

Hinweis: Ist F_{min} zu nah an der Resonanzfrequenz, kann es bei Eingangsspannungen über 15 V zur Zerstörung der Resonanzkondensatoren (C34-37) kommen. Treten dauerhaft Probleme mit C34-37 auf, sind sie zu entfernen und stattdessen C3 zu installieren (Hinweis im Schaltplan beachten).

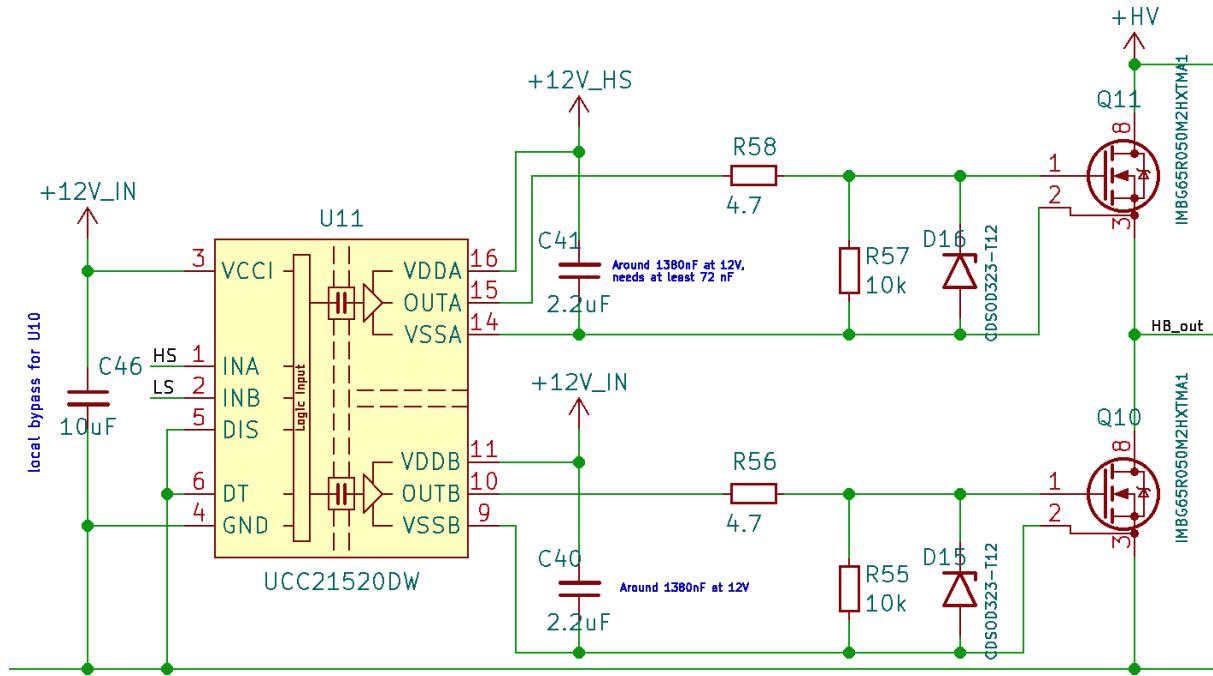
Bei Tests ab $V_{in} \geq 200$ V muss F_{min} bei 20 V unterhalb der minimalen Eingangsspannung so eingestellt werden, dass 24 V am Ausgang gerade so erreicht werden. Bei einer geplanten minimalen Eingangsspannung von 200 V sollte also mit 180 V am Eingang eine Ausgangsspannung von 24 V gerade so erreicht werden. Beispielhafte Spannungswerte können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Eingangsspannungsbereich	Testspannung für F_{min}
200 V bis 400 V	180 V
300 V bis 500 V	280 V
400 V bis 600 V	380 V

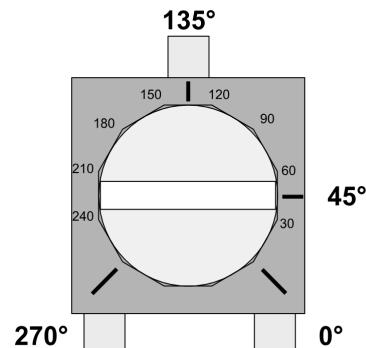
Bei dem Aufbau des Autors lag diese Frequenz bei ca. 94 kHz (180 V). Das Calc Sheet von Onsemi empfiehlt $F_{min} = 93$ kHz auf Basis des maximalen Gains unter Vollast. Es ist möglich, dass die Frequenz durch Toleranzen beim Nachbau um einige kHz abweicht. Bei größeren Abweichungen ist zu kontrollieren, ob die Kernhälften bündig zusammen sind (ein 1,0 mm Luftspalt nur im mittleren Schenkel) und die Anzahl der Primärwindungen korrekt ist.

Anmerkung: In einer früheren Version wurde eine Testspannung von 180 V für den gesamten Spannungsbereich von 200 V bis 600 V verwendet, um F_{min} einzustellen. Dies kann jedoch dazu führen, dass bei großen Stromspitzen am Ausgang der Regelkreis bis auf F_{min} nachregelt, was zu extrem hohen Strömen im Schwingkreis führt, wenn die Eingangsspannung zu hoch ist. Bei Tests über ca. 575 V und Zuschalten größerer Kapazitäten kann es zur Zerstörung der Halbbrücken FETs kommen. Es wird daher dringend empfohlen, die minimale Schaltfrequenz nur so niedrig wie nötig für die minimale Eingangsspannung einzustellen. Der Eingangsspannungsbereich für die jeweilige Testspannung sollte möglichst wenig überschritten werden. Eine Erhöhung der minimalen Schaltfrequenz bedeutet auch, dass bei geringerer Eingangsspannung die Ausgangsspannung nicht mehr erreicht werden kann. Weitere Details siehe [Git Issue](#).

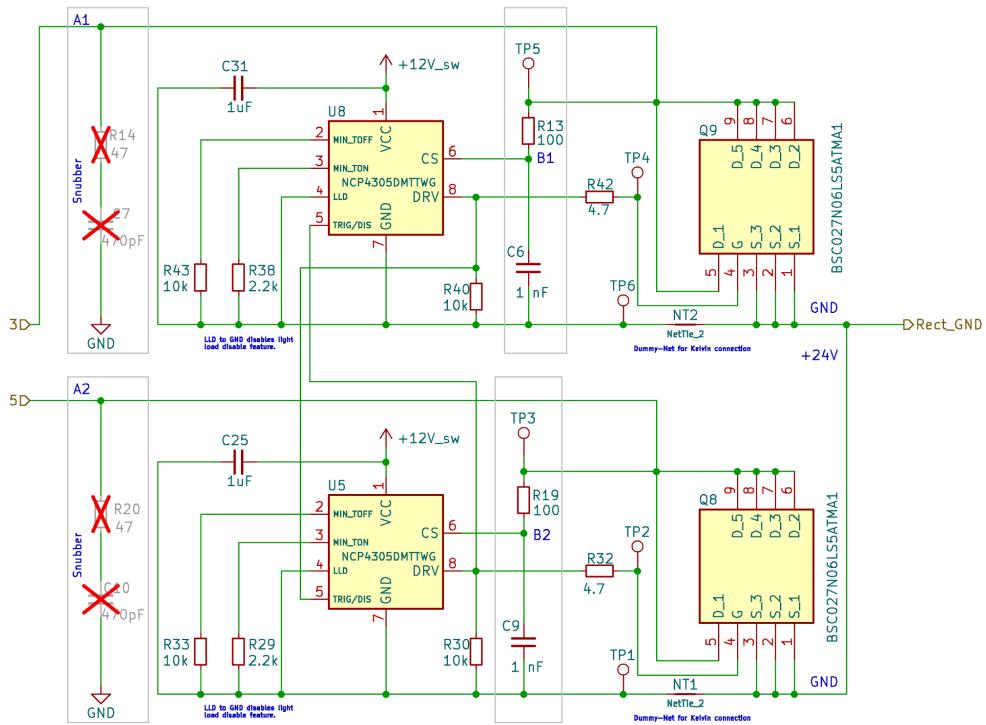
8.9 Totzeit (dead time bzw. Poti RV1)



Die beiden MOSFETs der Halbbrücke (Q10/Q11) schalten abwechselnd ein- und aus. Da sie aber immer eine kurze Verzögerung zum Ein- und Ausschalten haben, muss etwas Totzeit hinzugefügt werden, damit sie nicht beide gleichzeitig an sind (Kurzschluss). Idealerweise ist die Totzeit nur so kurz wie nötig, da während der Totzeit der Strom aus dem Schwingkreis durch die Body-Dioden der MOSFETs fließt (Verluste durch Spannungsabfall). In der Praxis kann die Totzeit so eingestellt werden, dass der Wirkungsgrad am höchsten ist. Wenn die Eingangsspannung und Last am Ausgang genügend konstant ist, reicht es nur am Eingang den Strom zu messen und zu schauen, dass dieser minimal wird. Für erste Tests kann dies bei 100 V am Eingang und ohne Last eingestellt werden. Später sollte man die Einstellung bei 600 V wiederholen, da hier die Schaltfrequenz am höchsten ist. Eine Position des Totzeitpotentiometer ca. 80° vom Minimum entfernt (CCW) (ca. 3 kΩ) wurde bisher als Optimum im gesamten Spannungs- und Lastbereich ermittelt. Eine Drehung im Uhrzeigersinn verkleinert die Totzeit. Von 0° bis etwa 60° von der min. Position ändert sich die Totzeit nicht, da der Controller eine minimale Totzeit von 120 ns hat.



8.10 Aktive Gleichrichtung (SR-Treiber)



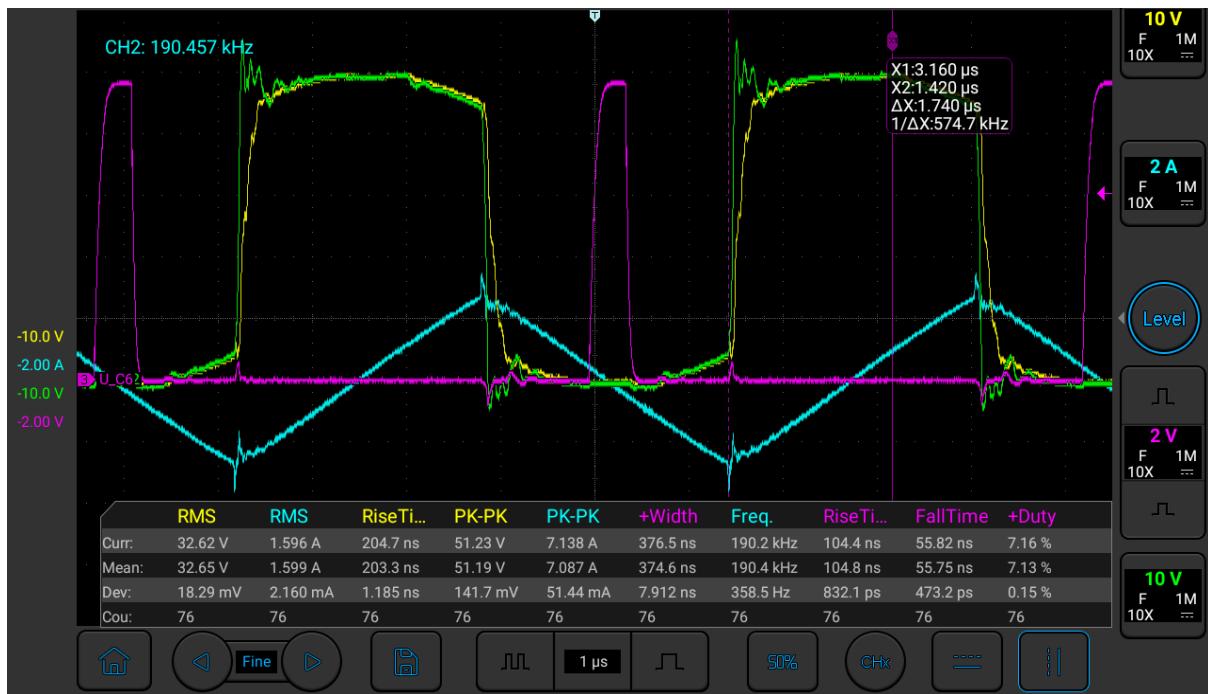
Für spätere Leistungstests muss kontrolliert werden, ob die SR-Treiber ordnungsgemäß funktionieren. Falls nicht, können die MOSFETs (Q8/Q9) überhitzen, da die Gleichrichtung andernfalls über die Body-Diode geschieht (viel Spannungsabfall).

Testparameter: $V_{in} = 50 \text{ V bis } 100 \text{ V}$, $V_{out} = 12 \text{ V bis } 24 \text{ V}$, $P_{out} = 0 \text{ W bis } 50 \text{ W}$

Zur Kontrolle wird ein Oszilloskop mit mindestens zwei Messkanälen empfohlen. Dabei wird jeweils zwischen Drain-Source (TP3 und TP1) und Gate-Source (TP2 und TP1) mithilfe einer Ground-Spring direkt auf dem Converter gemessen. Anschließend wird die Last am Ausgang erhöht und das Verhalten der Gate-Source Spannung beobachtet (siehe nachfolgende Oszillogramme).

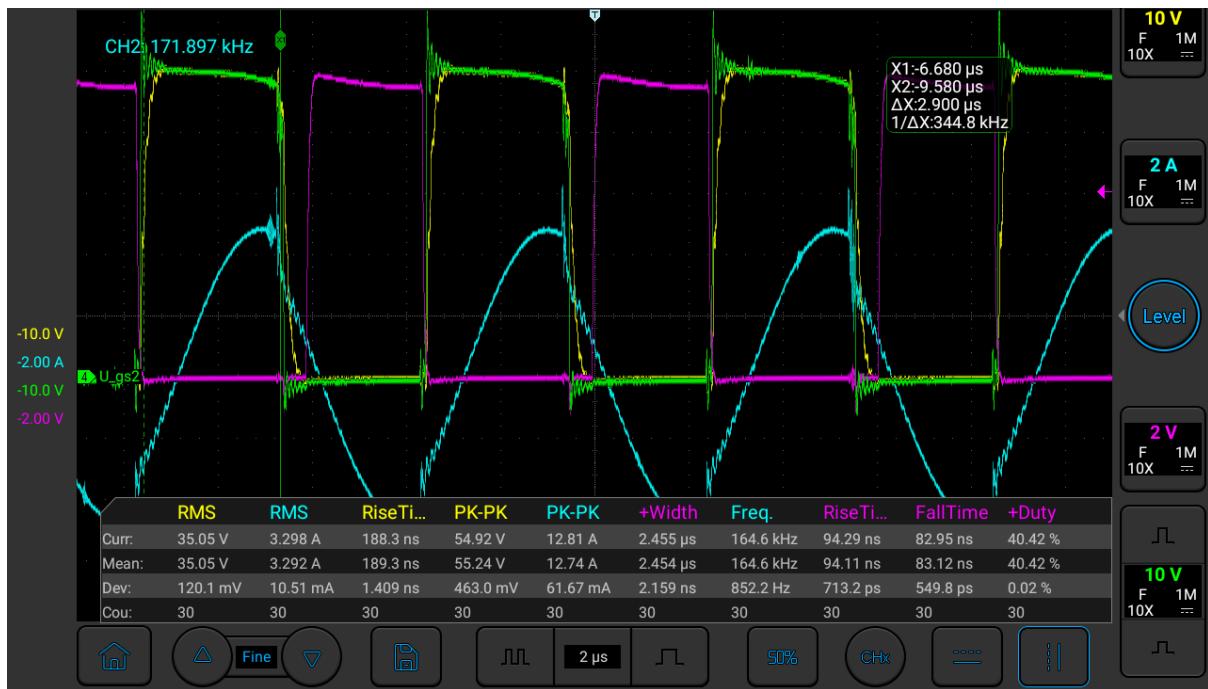
Hinweis: Da die Ausgangsspannung aufgrund der geringen Eingangsspannung vermutlich unterhalb der Regelspannung (24 V) liegt, ist bei der Lasterhöhung eine Verkleinerung der Ausgangsspannung zu erwarten.

Die Messung für die andere Gleichrichtung wiederholen. Eine Messung über Krokodilklemmen o.ä. anstatt einer Ground-Spring über den GND des Konverters ist zwar möglich, kann aber Störungen aufweisen (zur Kontrolle nicht so relevant wie zur Entwicklung).



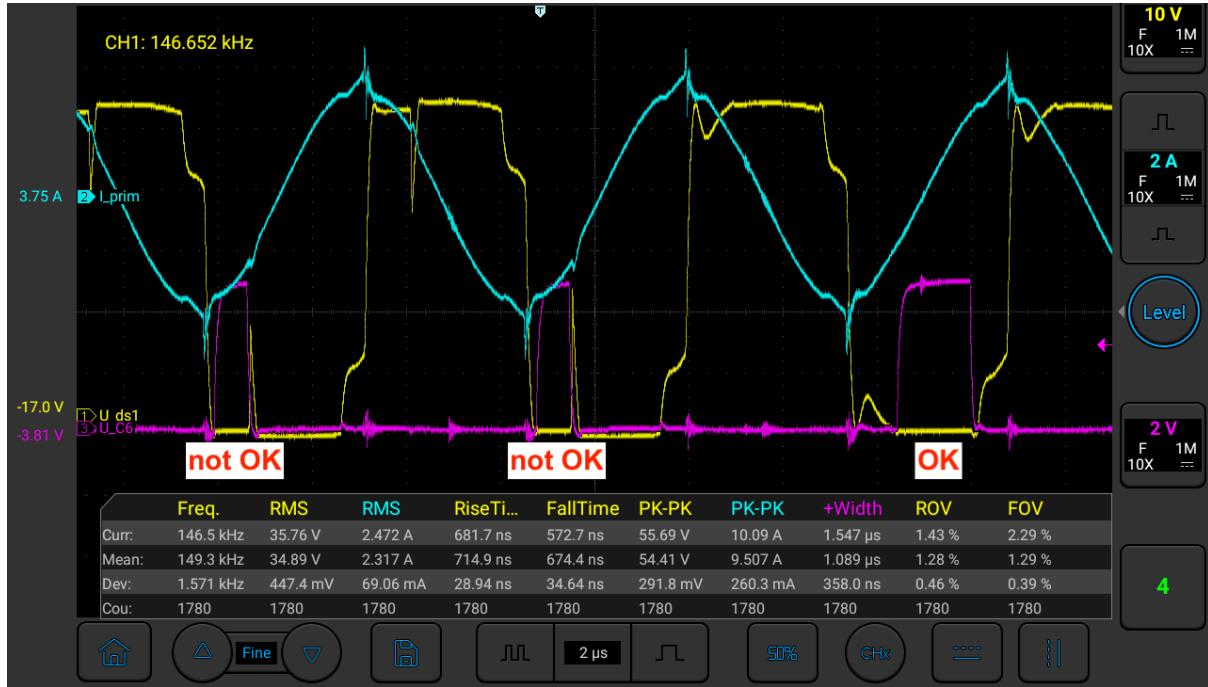
Screenshot: Aktive Gleichrichtung bei wenig Last (600 V Eingangsspannung)

Violett: Gate-Source Signal, Grün: Drain-Source Signal, Gelb: Drain-Source Signal nach Low-Pass, Cyan: Transformator Primärstrom (Strommessspule)



Screenshot: Aktive Gleichrichtung bei hoher Last (600 V Eingangsspannung)

Violett: Gate-Source Signal, Grün: Drain-Source Signal, Gelb: Drain-Source Signal nach Low-Pass, Cyan: Transformator Primärstrom (Strommessspule)



Screenshot: Beispiel fehlerhafte aktive Gleichrichtung bei geringer Last. Violett: Gate-Source Signal, Gelb: Drain-Source Signal, Cyan: Transformator Primärstrom (Strommessspule). Der Wechsel des Spannungsvorzeichens des Halbbrückenausgangs führt zum anregen einer Schwingung zwischen der Streuinduktivität des Transformators und parasitären Kapazitäten. Dies führt zu einem verfrühten Ein- und Ausschalten des SR-Treibers. Mehr zur Funktionsweise der aktiven Gleichrichtung im Kapitel "Aktive Gleichrichtung mit NCP4305" in der Dokumentation.

8.11 UVP/OVP Einstellen

Die Unter- und Überspannungsabschaltung werden über feste Spannungsteiler eingestellt. Standardmäßig sind sie auf etwa 200 V UVP und 610 V OVP mit ca. 10 V Hysterese eingestellt. Je nach Versorgungsquelle kann es aber sinnvoll sein, die Schwellwerte zu anzupassen, zum Beispiel gegen Tiefentladung des HV-Akkus bei versehentlichem Vergessen des DCDC-Konverters.

$$V_{ref} = 3.3V$$

$$V_{UVPenable} = V_{ref} \cdot \frac{R71 + (R67 + R68) \parallel R62}{(R67 + R68) \parallel R62}$$

$$V_{OVPenable} = V_{ref} \cdot \frac{R1 + (R65 + R66) \parallel R69}{(R65 + R66) \parallel R69}$$

Für eine UVP von ca. 200 V wurden $R67 = 100 \text{ k}\Omega$ und $R68 = 1.6 \text{ M}\Omega$ verwendet

Für eine UVP von ca. 400 V können $R67 = 22 \text{ k}\Omega$ und $R68 = 820 \text{ k}\Omega$ verwendet werden

Im Ordner `ltspice` befindet sich die entsprechende Simulation [DCDCv9-3r_OVP_UVP.asc](#)

8.12 Leistungstest

Da der Konverter schlussendlich in der Lage sein soll, große Leistungen möglichst effizient aus der Hochspannungsquelle in eine kleinere Ausgangsspannung zu wandeln, ist der Leistungstest mit Wirkungsgradmessung (und Temperaturmessung) die wichtigste Messung. *Man möchte ja nicht unbedingt ein Feuer entfachen...*

Aus vorherigen Tests konnte ermittelt werden, dass Folgende Verlustleistungen im Betrieb auftreten:

Verlustleistung	Hinweis
bis ca. 10 W	Verlustleistung ohne Last, kein Lüfter Notwendig
10 W - 13 W	bis ca. 300 W Last, kein Lüfter Notwendig bei Raumtemperatur
13 W - 20 W	bis ca. 500 W Last, Lüfter Notwendig, Grenze für Dauerleistungen
20 W - 25 W	bis ca. 750 W Last, Lüfter Notwendig, nur kurzzeitiger Betrieb (wenige Minuten)

Ziel ist es, dass die Temperaturen aller Bauelemente unterhalb ihrer zulässigen Grenzwerte bleiben. Auch wenn z. B. die SR MOSFETs bis 150 °C und die HF-Litze bis 155 °C aushalten würden, spricht eine geringere Temperatur für einen besseren Wirkungsgrad. Ein eigenes Ziel sind Temperaturen für alle Bauelemente unterhalb von 100 °C bei 500 W Dauerleistung. Ursprünglich war es auch das Ziel rein passiv, also ohne Lüfterkühlung, diese Dauerleistung zu erreichen, jedoch wurde das beim Verkleinern des Designs immer schwieriger. Natürlich kann mit einem großen Lüfter und Montage von Kühlkörpern die Leistung gesteigert werden, aber das würde mit der Kompaktheit des Systems konkurrieren. Kurzzeitig sind bei Maximallast Temperaturen der SR MOSFETs bis ca. 120 °C vertretbar. Darüber hinaus sollte dann die Übertemperaturabschaltung eingreifen (vorher kontrollieren, ob sie auch korrekt funktioniert!).

Side Fact: Die Sekundärwicklungen sind so massiv, dass sie auch als Kühlkörper der SR-FETs dienen und umgekehrt. Deswegen reicht es, den Lüfter nur am Trafo zu installieren, um auch die SR-FETs zu kühlen.

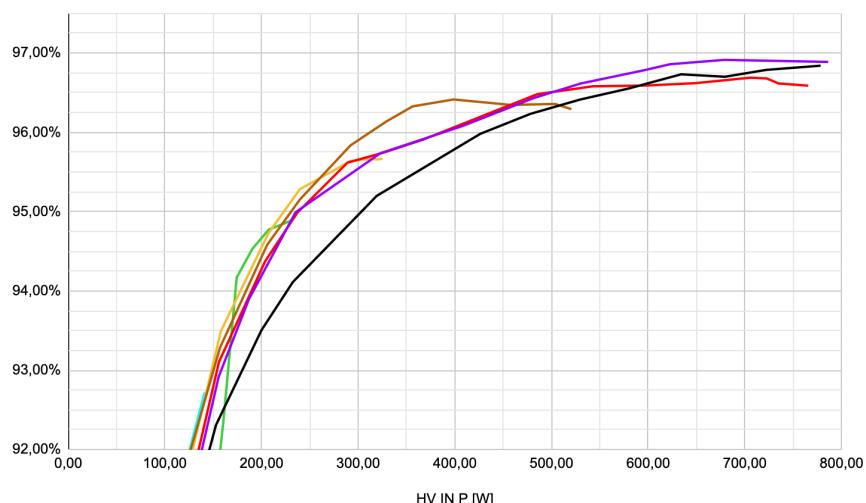
Für die Leistungsmessungen werden vorzugsweise folgende Spannungen/Leistungen getestet:

Spannung	Ausgangsleistung / Bemerkung
5 - 15 V	keine Leistung, geeignet zum Einstellen der minimalen Schaltfrequenz
50 V	max. 40 W
100 V	max. 130 W
150 V	max. 220 W
200 V (Hinweis zu F_{min} beachten!)	max. 300 W
300 V (Hinweis zu F_{min} beachten!)	max. 500 W
400 V (Hinweis zu F_{min} beachten!)	max. 750 W
500 V (Hinweis zu F_{min} beachten!)	max. 750 W
600 V (Hinweis zu F_{min} beachten!)	max. 750 W

Die Leistungen werden ebenfalls schrittweise eingestellt, wobei für die Wirkungsgradmessung bei geringer Last feiner aufgelöst wird als bei hoher Last.

z.B. 0 W, 1 W, 2 W, 5 W, 10 W, 20 W, 50 W, 100 W, 150 W, 200 W, 300 W, 400 W, 500 W, 600 W, 750 W. Je nach Ziel der Messung kann es auch sinnvoll sein, größere oder kleinere Abstände zu wählen, um Zeit zu sparen. Bei den ersten Tests wird aber empfohlen, möglichst viele Messpunkte zu erfassen, um später Referenzmesswerte bei Verbesserungen zum Vergleich zu haben, aber auch um sich langsam voran zu tasten, welche Leistungen und Spannungen zulässig sind, ohne dass Bauteile überhitzen. Eine Messung mit 15 Lastwerten für einen Spannungsbereich kann durchaus eine Stunde in Anspruch nehmen, inkl. 2 bis 5 vollständigen Messungen der Bauteiltemperaturen.

Efficiency vs. Input Voltage (92-97%)



Erste Wirkungsgradmessung der v9-3, Zeitaufwand ca. 7 Stunden, 114 Messzeilen

9 Bauteilkosten

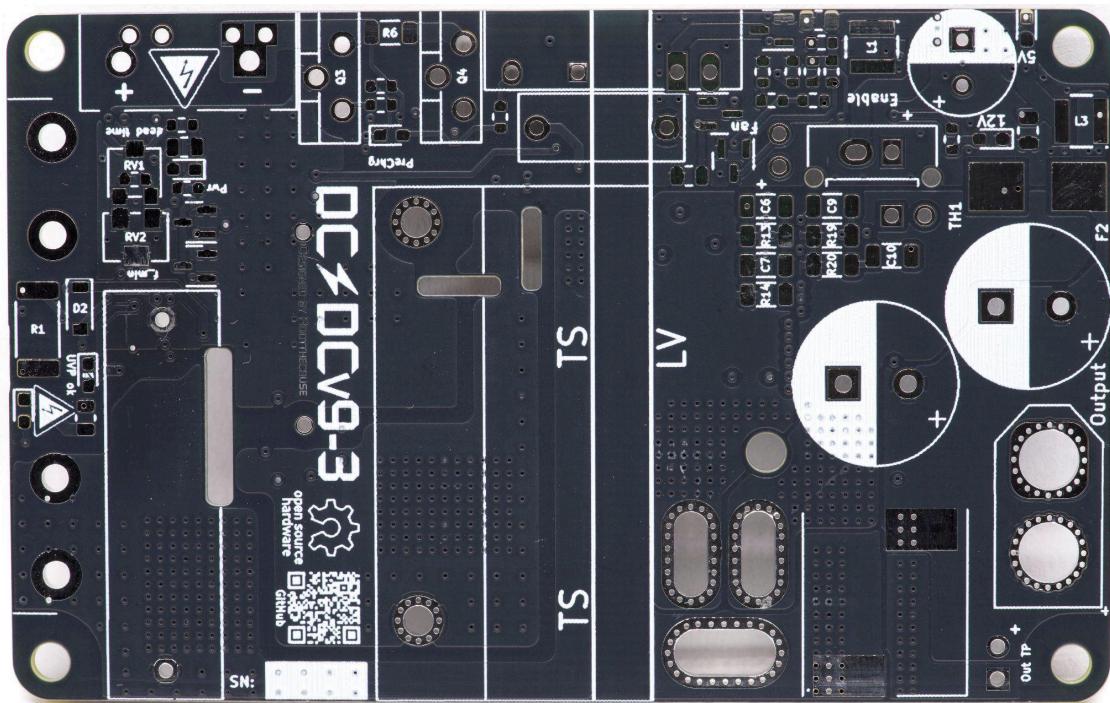
Die nachfolgenden Kosten beziehen sich auf den Nachbau eines Konverters.

Hinweis: Es wurden 15 PCBs davon 10 PBCA bestellt (die unbestückten Platinen dienen als Ansichtsmuster). Die Preise wurden für den DCDCv9-3 im angegebenen Zeitraum ermittelt und können je nach Umsatzsteuer, Bezugsquellen und Marktentwicklung variieren.

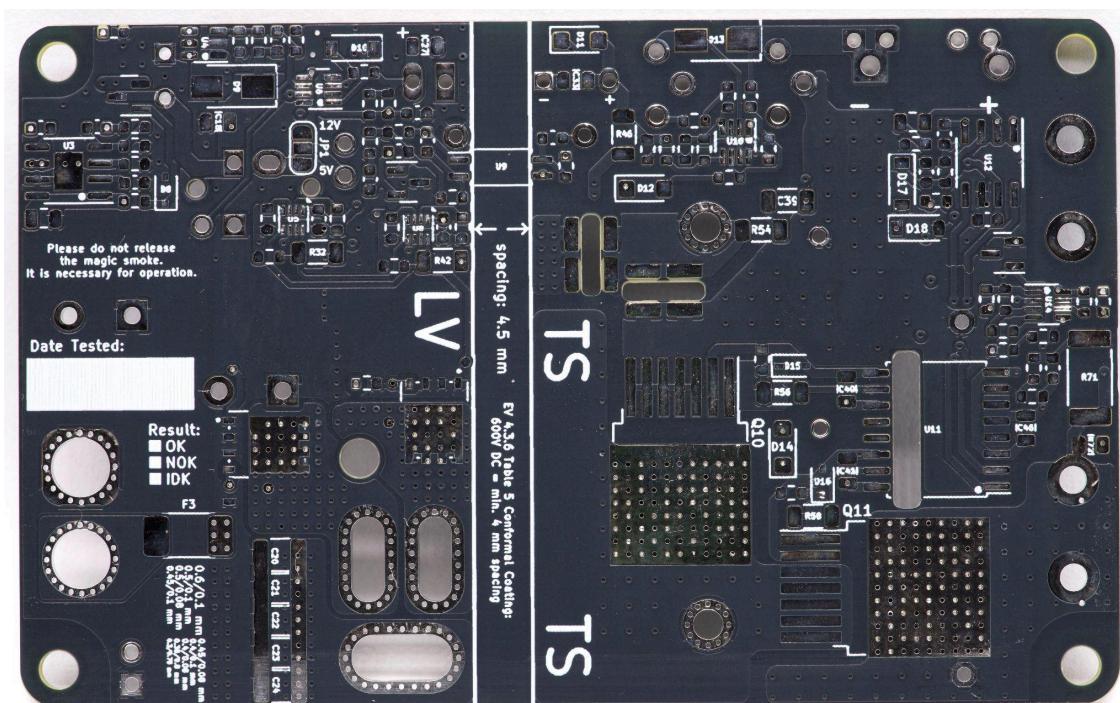
Objekt	Kosten total inkl. USt.	Datum Preis
PCB (bei 15 Stück bestellter Menge)	5,16 €	Okt. 2024
Assembly inkl. Komponenten (bei 10 Stück bestellter Menge)	23,63 €	Okt. 2024
PCB Versand (bei 15 Stück bestellter Menge)	3,36 €	Okt. 2024
PCB Zoll (bei 15 Stück bestellter Menge)	1,19 €	Okt. 2024
Mouser Bestellung für restliche Bauteile je PCBA ohne Mengenrabatt (mit Mengenrabatt ab 10 Stück)	94,06 € (74,46€)	Jan. 2025
XT60 male + female connector	0,80 €	Jan. 2025
5 V Fan	3,00 €	Jan. 2025
SLA Resin Flame Retardant HDT 250 ml (verbr. 11ml)	2,51 €	Jan. 2025
HF-Litze (180 cm Prim. + 35 cm Sek.)	4,96 €	Okt. 2024
Gesamtkosten (mit Mouser Mengenrabatt ab 10 Stück)	138,67 € (119,07€)	

10 Bildergalerie

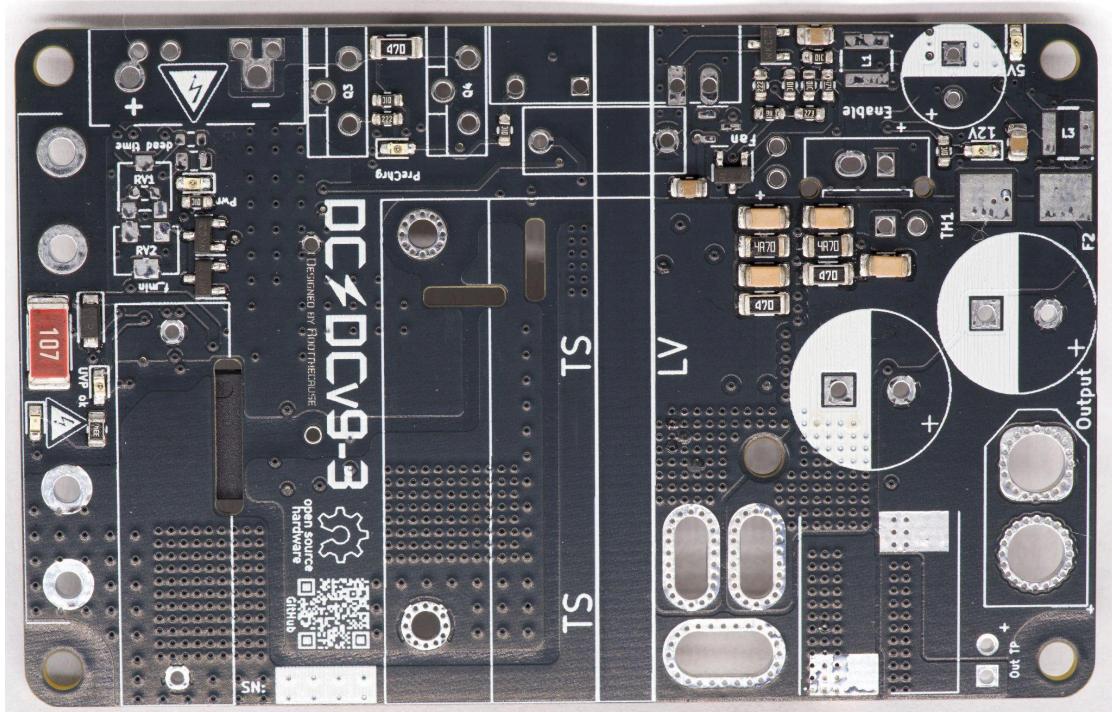
Die nachfolgenden Bilder zeigen den **DCDCv9-3** und dienen zur Orientierung für den Nachbau. Die Release-Version **DCDCv9-3r** besitzt kleine Änderungen auf der Rückseite, wie zusätzliche Kondensatoren und Snubber. Auf der Vorderseite wurde der HV-Input Stecker um 180° gedreht (Wellenmuster nach innen). Da die Bilder nach den Tests aufgenommen wurden, haben einige Bauteile Abnutzungsspuren.



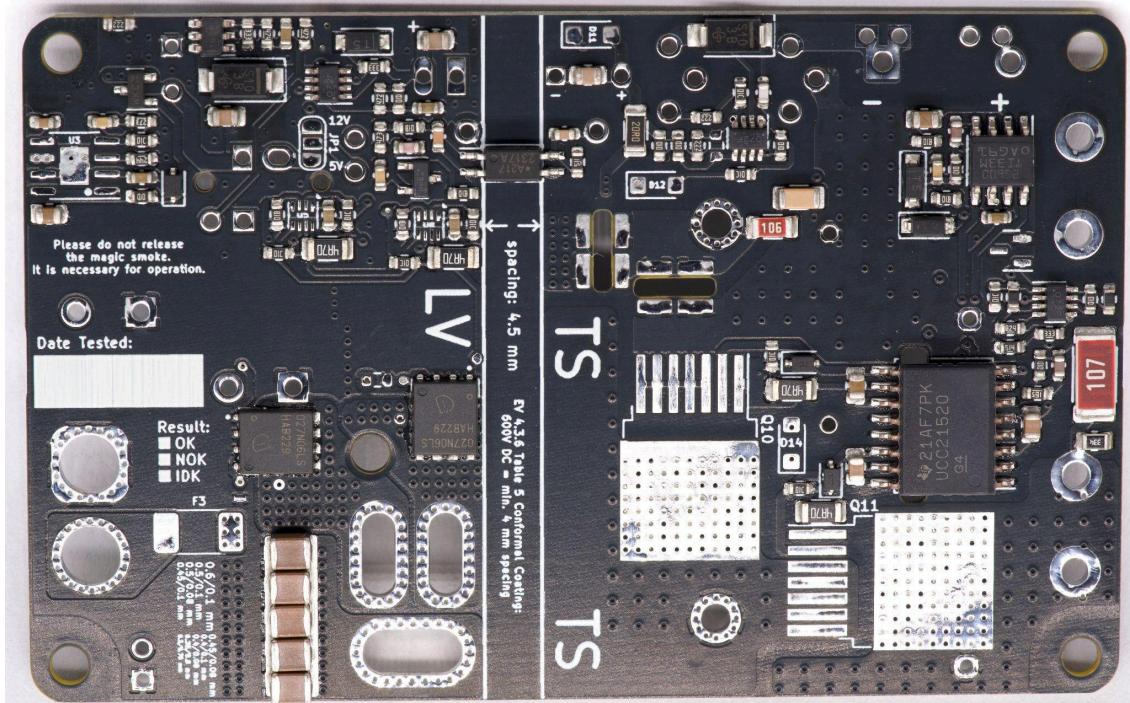
DCDCv9-3 PCB Vorderseite, leer



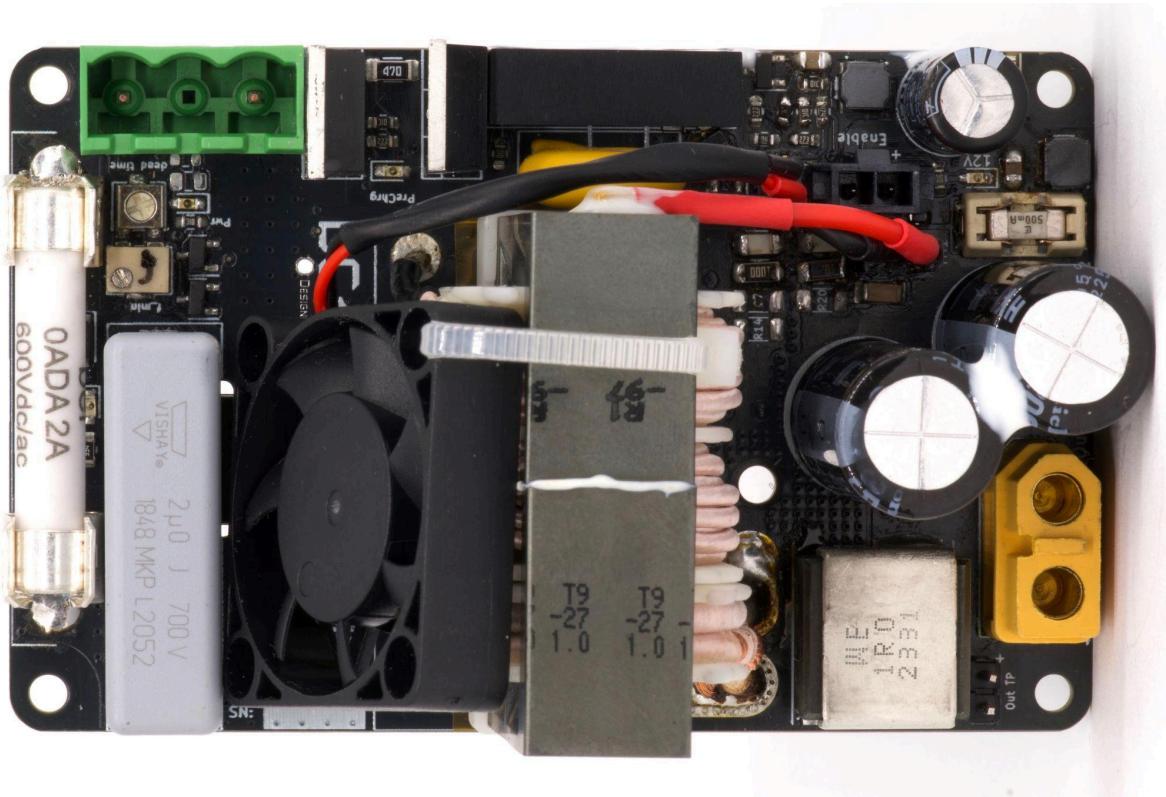
DCDCv9-3 PCB Rückseite, leer



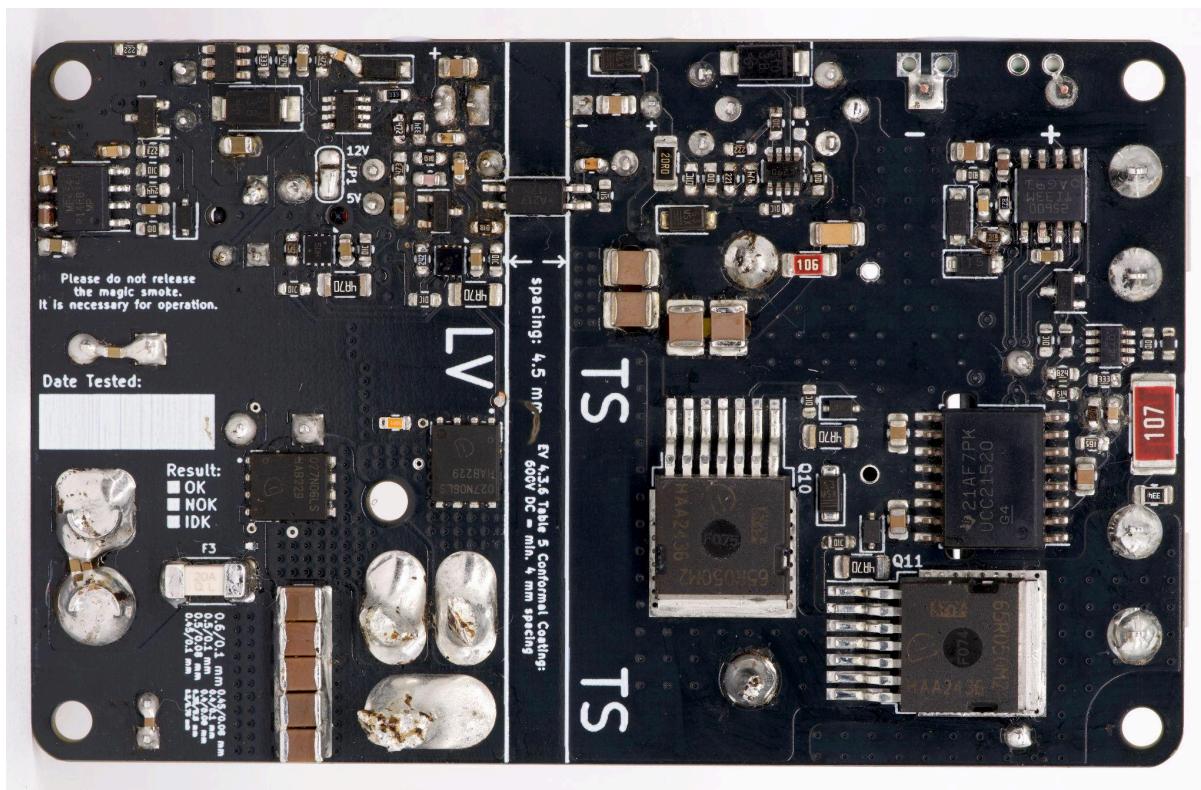
DCDCv9-3 PCBA Vorderseite, mit Bestückung



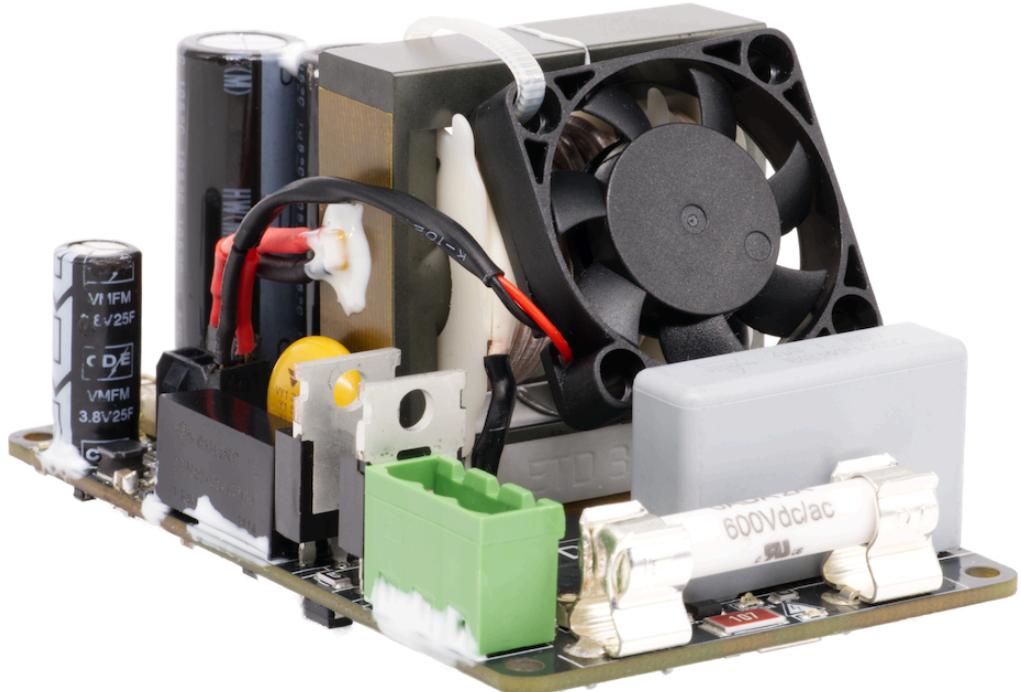
DCDCv9-3 PCBA Rückseite, mit Bestückung



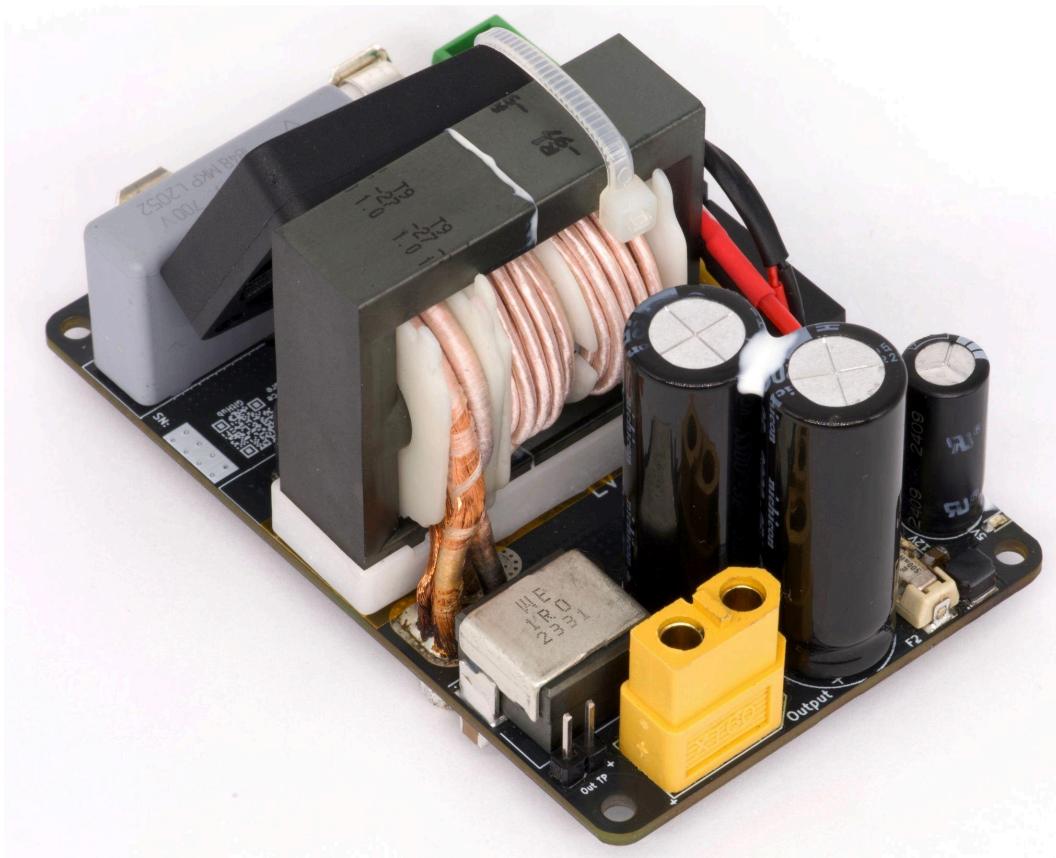
DCDCv9-3 PCB Vorderseite, Vollständiger Aufbau



DCDCv9-3 PCB Rückseite, Vollständiger Aufbau



DCDCv9-3 HV-Seitige Ansicht



DCDCv9-3 LV-Seitige Ansicht

Vielen Dank fürs Lesen! Bei Fragen, Kritik und Ideen zur Verbesserung der Dokumentation freut sich der Autor über [Feedback](#) :)

11 Revisionsverlauf

Datum	Änderung	Seite
18. Juli 2025	Plastik 70 durch Plastik 70 Super ersetzt, da nicht mehr empfohlen für die Formula Student. Pro Tipp: Plastik 70 Super ist UV-Fluoreszierend. Eine entsprechende UV-Taschenlampe dient zum Nachweis sämtlicher Coatings. Sicherungen zum Abkleben vor dem Coaten aufgelistet.	13/26
	Wichtige Änderung der Prozedur zum Einstellen der minimalen Schaltfrequenz auf Grundlage des Git Issues .	35/36
26. Juni 2025	Typo behoben. “Die Drehung des Potis im gegen den Uhrzeigersinn [...]”	35
23. Juni 2025	Verbesserung der Beschreibung der Sekundärwicklungen und deren Anschlussweise.	16
	Fehler bei zu hohem Enable-Schalter Widerstand hinzugefügt	29
	Fehler beim vertauschten der Sekundärwicklungen hinzugefügt.	30
	Hinweis IR-Thermometer Messgenauigkeit erweitert	31
11. Juni 2025	Hinweis hinzugefügt, dass 24 V am Ausgang nicht für Tests verwendet werden dürfen, da der Regelkreis U12 sonst abschaltet (was passieren muss - aber für Tests nicht sinnvoll ist)	29/30
21. Mai 2025	“Anleitung” durch “Build Guide” im ersten Satz des zweiten Abschnitts präzisiert	6
	“Specify Layer Sequence” spezifiziert	8
	Wording in der Unterschrift des Screenshots verbessert, “Stromvorzeichens” durch “Spannungsvorzeichens” ersetzt, die Werte von R67 und R68 für 400 V vertauscht (macht elektrisch keinen Unterschied, sieht aber besser aus)	39
	Revisionsverlauf für zukünftige Änderungen hinzugefügt	47
19. Februar 2025	Erstes Release	-

Hinweis: Die Seitenzahlen vergangener Revisionen werden nicht aktualisiert und sind daher nur für die letzte Revision akkurat.