



Hochschule  
München  
University of  
Applied Sciences

# Mechatronik Projekt- Entwicklung und Herstellung eines Umrichters für Drehstrommaschinen

Lukas Jansen: Mechanik – Thermische Belastung und Gehäuse

## Inhalt

Konzeptphase .....	2
Thermische Eigenschaften .....	2
Gleichrichter .....	2
IGBT-Baustein (IKCM20L60GA) .....	3
Kühlkörper .....	5
Konstruktion .....	6
Nachbearbeitung Kühlkörper .....	6
Abdeckung .....	7
Aufnahme und Abdeckung des Lüfters .....	8
Taster .....	10
Endmontage .....	11
Fazit .....	11
Verweise .....	12

## Konzeptphase

Während der Konzeptphase sind einige Grundlagen festzulegen. Ein erstes logisches Schaltbild kann erstellt werden. So ist die Gesamtaufgabe in Einzelaufgaben zu unterteilen.

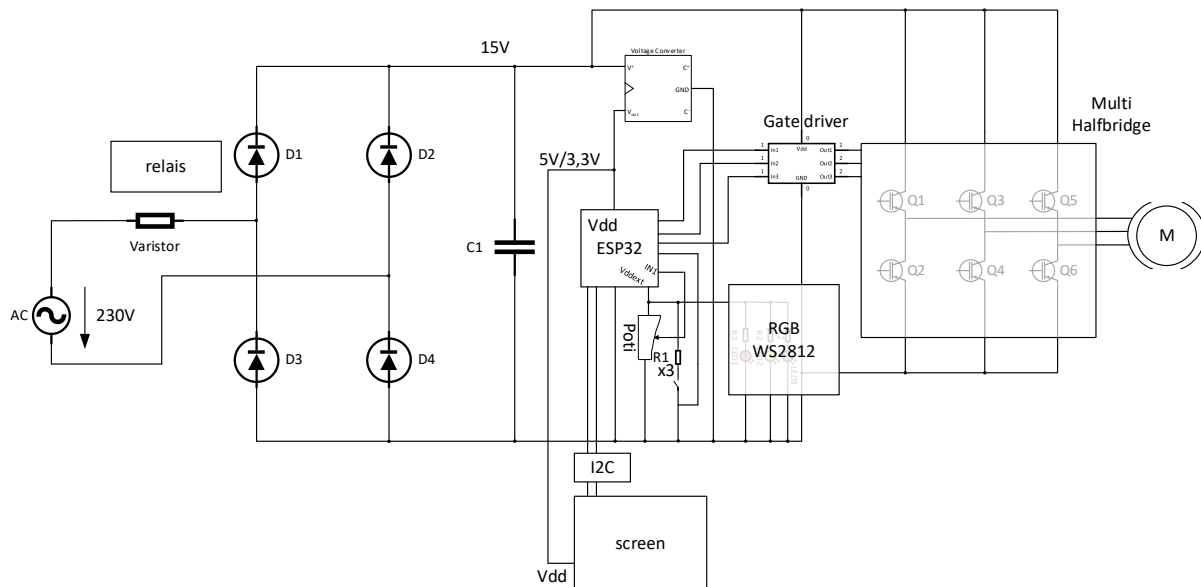


Abbildung 1: Erster logischer Schaltungsentwurf, ohne genauere Bauteilangaben.

So erhält man einen ersten Überblick über die einzelnen Bauteile und notwendige Modifikationen können nach dem ersten Ansatz bereits durchgeführt werden. Die Aufgabe ist es, einen Umrichter zu entwickeln, der zunächst die 230V Netzspannung über Gleichrichter in eine 15V Gleichspannung wandelt und diese dann mittels Halbbrücken IGBTs in eine dreiphasige Wechselspannung wandelt. Die Leistungsanforderungen an den Umrichter sind 3,6KW. Der Einsatzbereich liegt in der Kategorie für kleine bis mittlere Zerspanungsmaschinen.

## Thermische Eigenschaften

In diesem Abschnitt sollen die Thermischen Eigenschaften des Umrichters festgelegt werden. Unter diesen Bereich fällt in erster Linie das Kühlkonzept. Zunächst ist eine maximal zulässige Gehäuse-Temperatur vorzugeben. Da das Gehäuse in der Regel berührbar ist, wird hier eine Maximaltemperatur von 60°C gewählt, um Verletzungen durch Verbrennung vorzubeugen. Das ergibt bei typischer Umgebungstemperatur (Raumtemperatur = 20°C) einen erlaubten Temperaturhub von 40°C oder 40K. Mit dem vorgegebenen Bauraum sind somit die Anforderungen an das Kühlkonzept weitestgehend definiert.

Um die Anforderungsliste noch genauer zu spezifizieren ist die Wärmeleistung der eingesetzten Bauelemente zu ermitteln. Die kritischen Bauteile sind dabei die Umrichter-IGBTs und die Gleichrichter-Dioden. Nach der Bauteilauswahl kann aus der Spezifikation der Bauteile die zu kompensierende Leistung ermittelt werden.

### Gleichrichter

Die Spezifikation des Brückengleichrichters gibt folgende Leistungsverluste an.

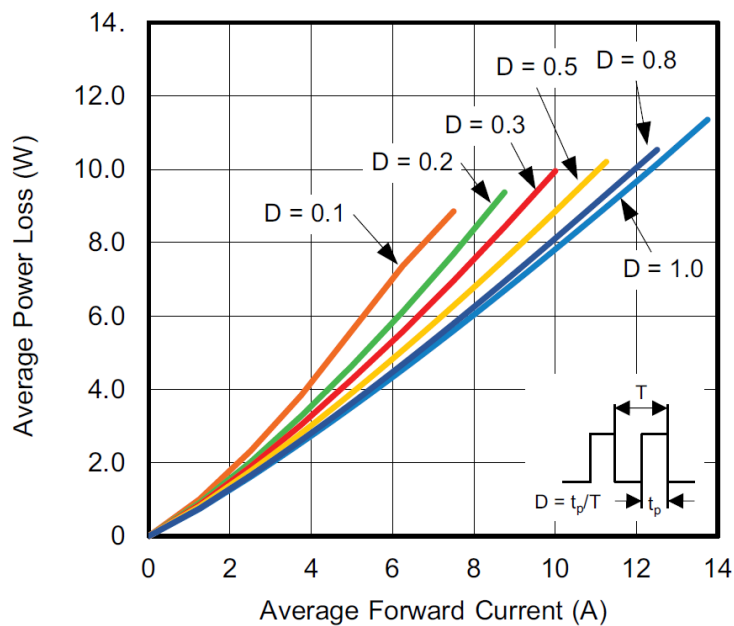


Abbildung 2: Brückengleichrichter – Leistungsverluste bei Vorwärtsbetrieb mit gegebenem Duty-cycle [1]

Die Verlustleistung ist ablesbar für einen Duty-Cycle von 0,8 – 1 bei 10A Stromverbrauch. Der Leistungsverlust beträgt 8– 10 Watt. Im Folgenden sind 10 Watt Verlustleistung im Brückengleichrichter angenommen. Diese Leistung wird in Wärme umgewandelt.

## IGBT-Baustein (IKCM20L60GA)

Die Ausgangsspannung wird von einem IGBT-Baustein bestehend aus 6 Halbbrücken-IGBTs und einem integrierten Brückentreiber zur Verfügung gestellt. Die in Wärme umgesetzte Leistung ergibt sich aus der Spezifikation des Bausteins.

Dynamic Parameters						
(V <sub>DD</sub> = 15V and T <sub>J</sub> = 25°C, if not stated otherwise)						
Description	Condition	Symbol	Value			Unit
			min	typ	max	
Turn-on propagation delay time	V <sub>LIN, HIN</sub> = 5V, I <sub>C</sub> = 15A, V <sub>DC</sub> = 300V	t <sub>on</sub>	-	620	-	ns
Turn-on rise time		t <sub>r</sub>	-	30	-	ns
Turn-on switching time		t <sub>c(on)</sub>	-	200	-	ns
Reverse recovery time		t <sub>rr</sub>	-	130	-	ns
Turn-off propagation delay time	V <sub>LIN, HIN</sub> = 0V, I <sub>C</sub> = 15A, V <sub>DC</sub> = 300V	t <sub>off</sub>	-	910	-	ns
Turn-off fall time		t <sub>f</sub>	-	75	-	ns
Turn-off switching time		t <sub>c(off)</sub>	-	120	-	ns
Short circuit propagation delay time	From V <sub>IT, TH+</sub> to 10% I <sub>SC</sub>	t <sub>SCP</sub>	-	1200	-	ns
Input filter time ITRIP	V <sub>ITRIP</sub> = 1V	t <sub>ITRIPmin</sub>	-	530	-	ns
Input filter time at LIN, HIN for turn on and off	V <sub>LIN, HIN</sub> = 0V & 5V	t <sub>FILIN</sub>	-	290	-	ns
Fault clear time after ITRIP-fault	V <sub>ITRIP</sub> = 1V	t <sub>FLTCLR</sub>	40	65	200	μs
Deadtime between low side and high side		DT <sub>PWM</sub>	1.5	-	-	μs
Deadtime of gate drive circuit		DT <sub>IC</sub>	-	380	-	ns
IGBT turn-on energy (includes reverse recovery of diode)	V <sub>DC</sub> = 300V, I <sub>C</sub> = 15A T <sub>J</sub> = 25°C 150°C	E <sub>on</sub>	-	470 610	-	μJ
IGBT turn-off energy	V <sub>DC</sub> = 300V, I <sub>C</sub> = 15A T <sub>J</sub> = 25°C 150°C	E <sub>off</sub>	-	270 360	-	μJ
Diode recovery energy	V <sub>DC</sub> = 300V, I <sub>C</sub> = 15A T <sub>J</sub> = 25°C 150°C	E <sub>rec</sub>	-	55 105	-	μJ

Abbildung 3: Dynamische Parameter des IGBT-Bausteins. [2]

Abbildung 3 stellt die Schaltparameter des IGBT-Bausteins dar. Markiert sind die Schaltenergien, die zur Erwärmung beitragen. Zusätzlich müssen die statischen Parameter betrachtet werden.

Static Parameters						
(V <sub>DD</sub> = 15V and T <sub>J</sub> = 25°C, if not stated otherwise)						
Description	Condition	Symbol	Value			Unit
			min	typ	max	
Collector-Emitter saturation voltage	I <sub>C</sub> = 15A T <sub>J</sub> = 25°C 150°C	V <sub>CE(sat)</sub>	- -	1.55 1.85	2.05 -	V
Diode forward voltage	I <sub>F</sub> = 15A T <sub>J</sub> = 25°C 150°C	V <sub>F</sub>	- -	1.7 1.7	2.4 -	V

Abbildung 4: Statische Parameter des IGBT-Bausteins – Auszug [2]

Abbildung 4 zeigt die statischen Parameter des Bausteins. Hier ist die Dioden-Vorwärtsspannung und der Vorwärtsstrom von Interesse. Der relevante Bereich ist markiert. Es wird der Typische Wert bei 25°C angenommen.

Tabelle 1 stellt die Berechnungsgrundlagen für die Wärmeverluste übersichtlich zusammen.

Strom im Vorwärtsbetrieb	$I_{FW}$	16	$\frac{A}{Phase}$
Spannungsabfall im Vorwärtsbetrieb	$V_F$	1,7	V
Verlustleistung im Vorwärtsbetrieb pro Phase	$P_V = 16A * 1,7V$	27,2	$\frac{W}{Phase}$
Verlustleistung Aktiv Vorwärtsbetrieb	$P_{tot01}$	81,6	W
Energieverluste beim Abschalten	$IGBT_{Eoff}$	270	μJ
Energieverluste beim Einschalten	$IGBT_{Eon}$	470	μJ
Schaltfrequenz im Normalbetrieb	$F_{PWM}$	10	KHz
Verlustleistung durch Umschaltvorgänge	$P_{SW} = (IGBT_{Eoff} + IGBT_{Eon}) * F_{PWM}$	22,2	W
Verlustleistung Gesamt	$P_{tot} = P_{tot01} + P_{SW}$	<b>103,8</b>	<b>W</b>
Verlustleistung mit Sicherheitsfaktor von 10%	$P_{SF} \approx (P_{tot} + P_{tot} + P_{BRGR}) * 1,1$	<b>120</b>	<b>W</b>

Tabelle 1: Verlustleistung durch IGBTs. Werte entstammen dem Datenblatt für die IGBTs von Infineon Technologies

Es ergibt sich eine Verlustleistung von 120 Watt. Unter der Annahme, dass diese Leistung vollständig in Wärme umgewandelt wird, und die Gesamttemperatur des Geräts 60°C nicht überschreiten soll, stehen die Anforderungen an den Kühlkörper fest.

$$R_{thK} = \frac{60^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{120\text{W}} = 0,33 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

## Kühlkörper

Die Auslegung des Kühlkörpers kann in zwei Bereiche geteilt werden. Aktive und passive Kühlung. Zunächst wird versucht eine passive Kühlung einzusetzen. Es kommen unterschiedliche Bauweisen von Kühlkörpern in Frage.

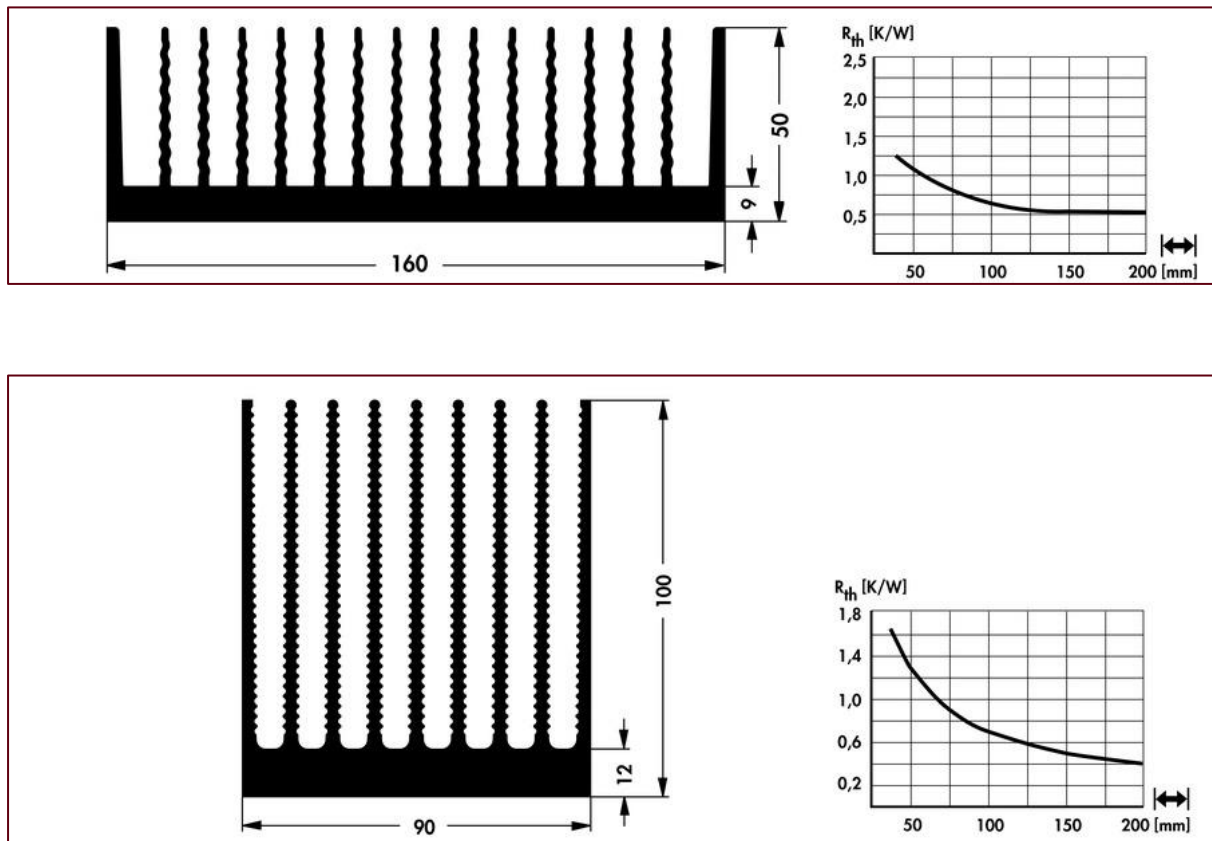


Abbildung 5: Profile ähnlicher Kühlkörper und deren Thermischer Widerstand über der Länge [3] , [4]

Die gezeigten Kühlkörper in Abbildung 5 erfüllen die Anforderungen an den gewünschten thermischen Widerstand nicht vollständig. Jedoch passen sie zu den Abmessungen der Leiterplatte mit  $120 \times 150 \text{ mm}^2$ . Ein weiterer Kühlkörper aus dem Materialvorrat des Labors für Leistungselektronik mit ähnlichen Abmessungen wird verwendet. Es wird dabei der gleiche thermische Widerstand von  $0,5 \text{ K/W}$  angenommen. Da dies nicht ausreichend ist um die Erwärmung des Gesamtbauteils um  $40 \text{ K}$  zu beschränken, ist es notwendig aktiv zu kühlen.

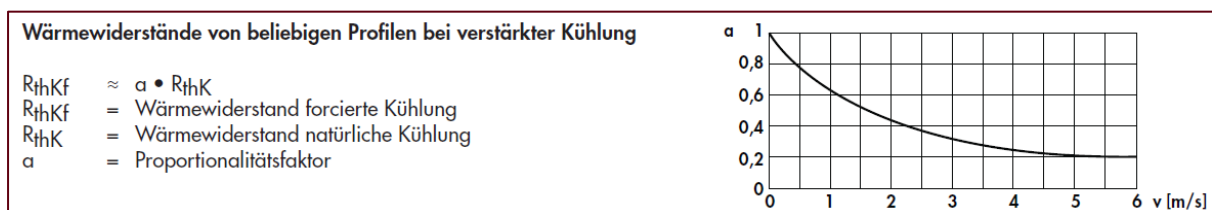


Abbildung 6: Anpassung des thermischen Widerstandes mit forcierter Kühlung [5]

Abbildung 6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Wärmewiderstand aus natürlicher Kühlung und dem Wärmewiderstand durch forcierte Kühlung. Rechts neben dem mathematischen Zusammenhang ist der Proportionalitätsfaktor Alpha über der Windgeschwindigkeit für forcierte Kühlung dargestellt.

Es gilt:

$$R_{thK} = 0,5 \text{ und } R_{thKf} = 0,33 \Rightarrow \alpha = \frac{0,33}{0,5} = 0,6 \Rightarrow v_{Wind} = 1,2 \frac{m}{s}$$

Damit ist kann der Lüfter ausgewählt werden. Bei den meisten Lüftern ist in der Regel der Volumenstrom in Kubikmeter pro Stunde angegeben. Über die Oberfläche des Lüfters und Umrechnung in Meter Pro Sekunde ergibt sich eine Geschwindigkeit, bei der ein Abschlag von 20% durchgeführt wird, aufgrund der später noch angebrachten Schutzkappe.

$$V_{wind} = \frac{\text{Volumenstrom}}{\text{Lüfteroberfläche}} * 0,8 = \frac{18 \frac{m^3}{h}}{0,0025m^2 * 3600s} * 0,8 = 1,6 \frac{m}{s}$$

Der Ausgewählte Lüfter hat eine Oberfläche (konservativ geschätzt) eine Oberfläche von 50x50mm<sup>2</sup>. Man könnte hier auch eine radiale Oberfläche für den Luftstrom ansetzen. Dies würde die Windgeschwindigkeit jedoch noch weiter erhöhen, da die radiale Fläche, die von den Rotorblättern des Lüfters abgedeckt wird kleiner ist als die Außenmaße des Lüfters.

Das Thema thermische Eigenschaften ist somit ausreichend berücksichtigt.

## Konstruktion

Der Frequenzumrichter besteht im Grunde aus vier Einzelteilen, den Lüftern, dem Kühlkörper, der Leiterplatte und einer Abdeckung. Da die Leiterplatte durch den Leiterplattenentwurf fest vorgegebene Geometrien verfügt, beschränkt sich die Konstruktion auf die Abdeckung, die Nachbearbeitung des Kühlkörpers und eine Aufnahme, sowie eine Schutzkappe für die Ventilatoren.

### Nachbearbeitung Kühlkörper

Der Kühlkörper muss auf die Leiterplatte zugeschnitten werden. Er hat eine Erdungs- und Gehäuse-Trägerfunktion. Der Kühlkörper schützt die Leiterplatte vor Verbiegen. Stoßsicherheit ist durch den Kühlkörper nicht gegeben.

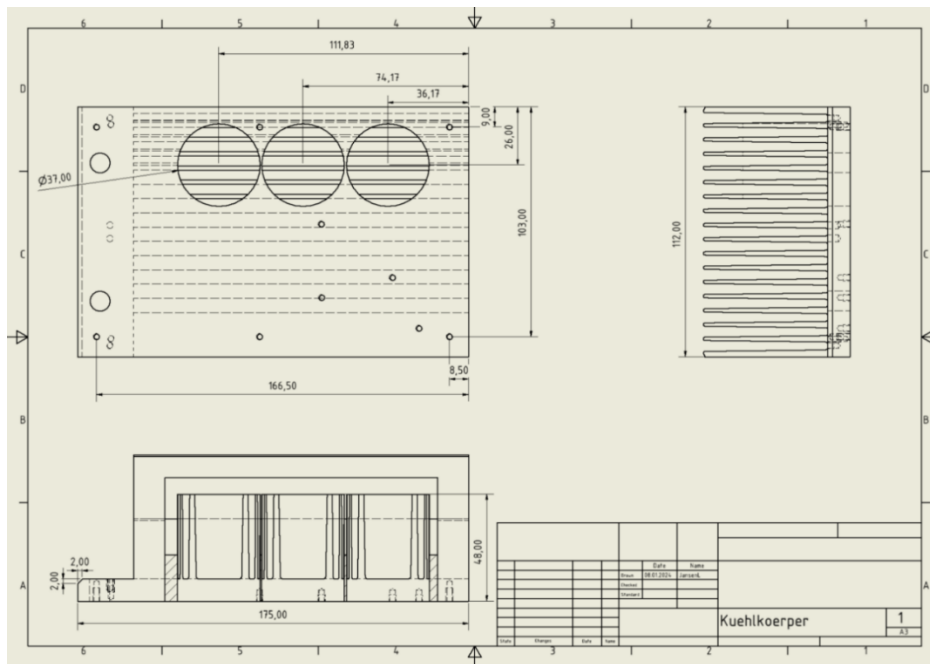


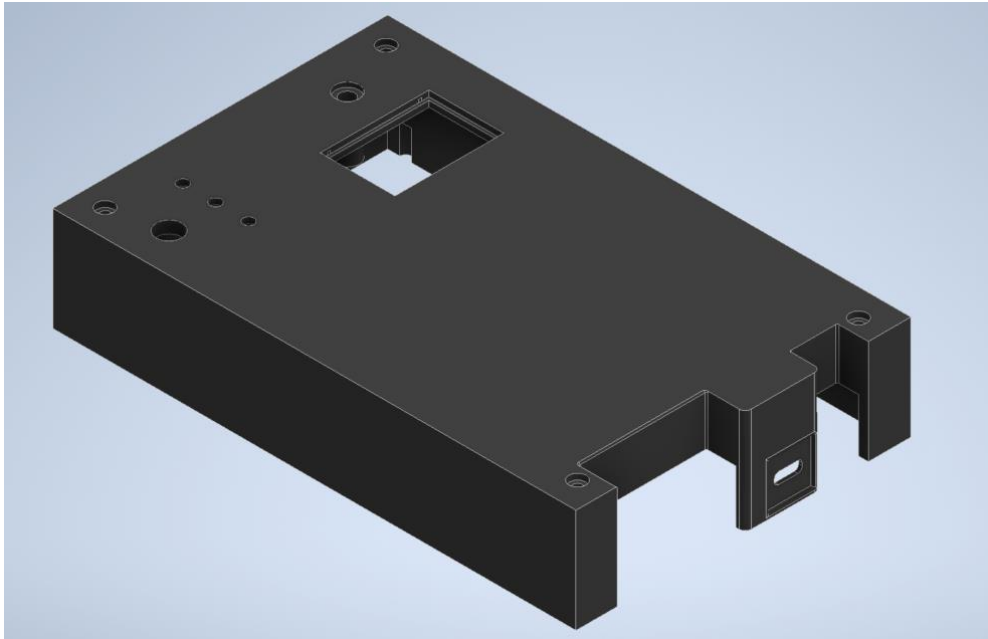
Abbildung 7: Fertigungsorientierte Zeichnung des Kühlkörpers mit Schnittdarstellung in der unteren linken Ecke.

Der Kühlkörper dient des Weiteren als festes Grundelement. Hier werden alle Schrauben befestigt. Löcher für die Kondensatoren auf der Leiterplatte sind ebenfalls notwendig. Abbildung 7 zeigt die Zeichnung zum Fräsen besagter Löcher. In diesem Fall wurde auf fertigungsnahe Bemaßung geachtet.

Die Bearbeitung des Kühlkörpers erfolgte mit Kappsäge, CNC-Fräsmaschine und Standbohrmaschine. Die Schraubenlöcher sind als M3 Standardgewinde ausgeführt.

## Abdeckung

Die Abdeckung dient in erster Linie als Berührschutz. Leichte Verschmutzungen können abgehalten werden. Gegen Spritzwasser ist das Gehäuse nicht sicher. Stöße durch spitze und harte Gegenstände können von der Schutzkappe nur bedingt abgehalten werden. Die Schutzkappe darf mit konstanten bzw. schwellenden Zug- oder Druckkräften belastet werden.



*Abbildung 8: Abdeckung der Leiterplatte mit Schraubenlöchern zur Durchsteckmontage und Aussparungen für sämtliche Elemente der Mensch-Maschine-/ Maschine-Maschine Schnittstelle*

Wie Abbildung 8 erkennbar, ist die Abdeckung mit Aussparungen für USB-C Schnittstelle, Anschlussklemmen, Taster und Potentiometer, sowie einem Fenster für den Bildschirm und die RGB-LED zur Statusanzeige versehen. An dieser Stelle könnte eine Simulation für mechanische Belastungsfähigkeit erstellt behandelt werden.

#### - Simulation

Als Fertigungsverfahren kam das FDM-3D-Druckverfahren zum Einsatz. Hier ist es zweckmäßig 100% Materialausfüllung einzustellen, um eventuell spätere Änderungen (zb. Weitung der Bohrungen und Ausschnitte) zu ermöglichen. Dennoch ist es wichtig, Spieltoleranzen einzuräumen. Hier wurde der Lochdurchmesser auf -0,2mm ausgeführt, während die Aussparungen für die Anschlüsse ebenso auf -0,2mm konstruiert sind.

#### Aufnahme und Abdeckung des Lüfters

Die Aufnahme des Lüfters ist als Klammer ausgeführt, die den Lüfter umgreift und mit M3 Schrauben befestigt ist.



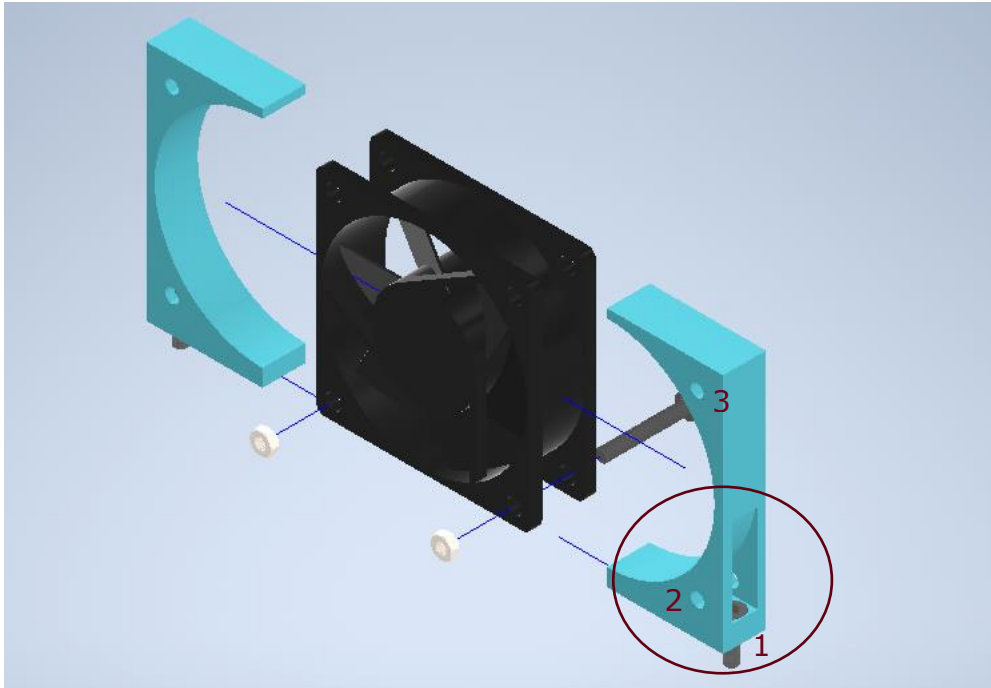


Abbildung 9: Explosionsdarstellung des montierten Lüfters und seiner Aufnahme

Ein wichtiges Detail zeigt Abbildung 9. Um den Platzbedarf zu reduzieren wurden die Schrauben, die die Klammer am Kühlkörper befestigen (1) versenkt ausgeführt, um die kreuzende Schraube, die den Lüfter mit der Klammer verbindet (2) darüber kreuzt. Des Weiteren ist eine Aussparung zur erleichterten Montage der senkrechten Schraube (1) vorgesehen. Die Abdeckung des Lüfters kann über die waagrechten Schrauben (2) und (3) an den Klammern befestigt werden. Die Abdeckung ist notwendig, um den Lüfter vor grober Verschmutzung zu schützen.

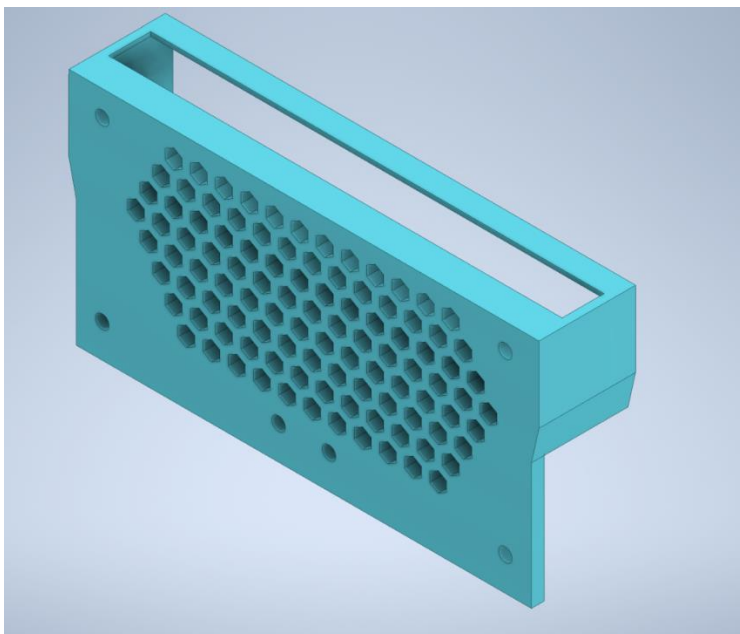


Abbildung 10: Abdeckung des Lüfters mit Polygonmuster für die Luftzufuhr.

Abbildung 10 veranschaulicht die Ausführung der Abdeckung des Lüfters. Ein Polygonmuster ermöglicht den Luftstrom und soll gleichzeitig größere

Verschmutzungen vermeiden. Schraubenlöcher für die Montage sind ebenfalls als M3 Durchsteckmontage vorgesehen. Gefertigt wurden beide Bauteile mit dem FDM-3D-Druckverfahren.

## Taster

Da die Taster auf der Leiterplatte unter der Abdeckung verborgen sind, müssen Verlängerungen für die Taster entworfen werden. In der Abdeckung wird eine Führung für den Taster eingebaut. Die Verlängerung selbst wurde mit einer Druckfeder versehen, um die Verlängerung in Position zu halten. Gefertigt wurden die Taster mit FDM-Druckverfahren. Hier ist zu erwähnen, dass der FDM-Druck nicht für diese Dimensionen geeignet ist. Die Fertigung der Taster ist nicht gelungen. Ein alternatives Druckverfahren wäre das SLA-Druckverfahren, bei dem eine höhere Auflösung und somit besser Genauigkeit und kleinere Bauteile gefertigt werden können. Die Materialeigenschaften und Dimensionen der Druckfeder sind in folgender Tabelle aufgelistet.

<i>Minimale Arbeitslänge</i>	$L_W = 7,5$	<i>mm</i>
<i>Federkonstante</i>	$c = 0,06$	$\frac{N}{mm}$
<i>Außendurchmesser</i>	$d = 3,45$	<i>mm</i>
<i>Drahtdurchmesser</i>	$b = 0,25$	<i>mm</i>

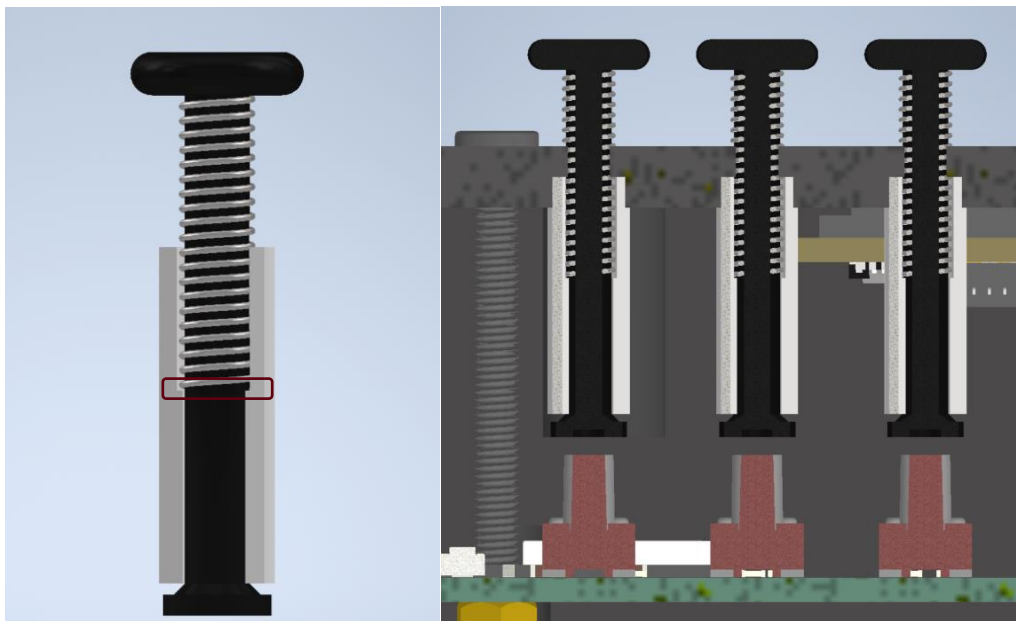


Abbildung 11: Taster, als Einzeldarstellung links und rechts im Gehäuse eingebaut als Schnittdarstellung

Das Taster-Design ist in Abbildung 11 dargestellt. Auf der linken Seite ist ein einzelner Taster zu erkennen. Rot markiert ist der Absatz, auf dem die Druckfeder sitzt. Rechts ist eine Schnittdarstellung der Taster im Gehäuse zu erkennen. Unten in grüner Farbe sichtbar ist die Leiterplatte. Die eigentlichen Taster sind in rot dargestellt und darüber befindet sich die Verlängerung der Taster (schwarz) mit Führung (weiß) und Druckfeder (metallic).

## Endmontage

Das Finale Ergebnis der Konstruktion ist in Abbildung 12 links und als Explosionszeichnung (rechts) dargestellt. Bei der Endmontage traten aufgrund von Fertigungstoleranzen Probleme auf. Die Abdeckung musste nachbearbeitet werden (geschliffen). Zusätzlich erwiesen sich zwei Bohrungen am Kühlkörper als fehlerhaft. Acht Bohrungen mussten mit Hand gefertigt werden. Dabei kam es zu größeren Messungenauigkeiten beim Anreißen. Als Anreißwerkzeug wurde ein Messschieber verwendet, dessen Messbereich kleiner war als der Abstand der Bohrungen zur Bemaßungskante. Es musste eine zweite Bemaßungskante verwendet werden. Somit addieren sich die Toleranzen für die Länge des Kühlkörpers und die der Bohrungen. Im Endergebnis sind die Schraubenlöcher um etwa 200 Micrometer gegenüber den Durchstecklöchern auf der Abdeckung versetzt. Die Schrauben am vorderen Ende des Umrichters konnten deshalb nicht montiert werden.

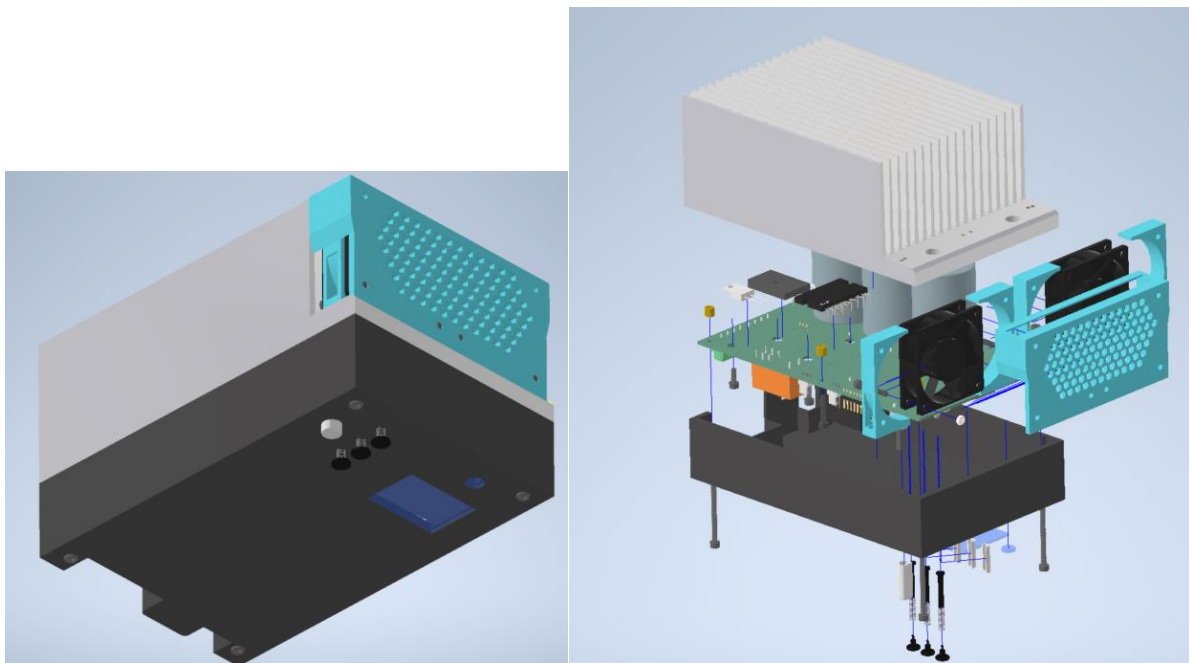


Abbildung 12: Montiertes Gehäuse, links und Explosionszeichnung rechts

## Fazit

Das Gehäuse besteht aus den Einzelteilen Kühlkörper, Abdeckung, Lüfter – Gehäuse und Aufnahme. Weitere Kleinteile wie Taster Verlängerung und Potentiometer Verlängerung waren ebenfalls zu entwerfen. Grundsätzlich ist das FDM-3D Druckverfahren ein gut geeignetes Fertigungsverfahren, besonders wenn es um schnelle Prototypenfertigung geht. Es bringt jedoch Einschränkungen in Größe der zu fertigenden Bauteile mit sich. Ein wichtiges Element in der Entwicklung eines Technischen Geräts ist die Projektplanung. Speziell im Bezug auf die Taster, hätte der Einsatz eines anderen Fertigungsverfahrens womöglich eine Lösung darstellen können. Dazu wäre es nötig gewesen, erste Testdrucks bereits in einer früheren Projektphase anzufertigen. Im Bezug auf die Mechanischen Bauteile wäre es zweckdienlicher gewesen, kleinere und genauer spezifizierte Meilensteine zu festzulegen und deren Einhaltung stärker zu verfolgen.

Abbildung 1: Erster logischer Schaltungsentwurf, ohne genaue Bauteilangaben, jedoch nach prinzipiell richtigem Aufbau.....	2
Abbildung 2: Brückengleichrichter – Leistungsverluste bei Vorwärtsbetrieb mit gegebenem Dutycycle [1] .....	3
Abbildung 3: Dynamische Parameter des IGBT-Bausteins. [2].....	4
Abbildung 4: Statische Parameter des IGBT-Bausteins – Auszug [2] .....	4
Abbildung 5: Profile ähnlicher Kühlkörper und deren Thermischer Widerstand über der Länge [3] , [4] .....	5
Abbildung 6: Anpassung des thermischen Widerstandes mit forcierter Kühlung [5].....	5
Abbildung 7: Fertigungsorientierte Zeichnung des Kühlkörpers mit Schnittdarstellung in der unteren linken Ecke.....	7
Abbildung 8: Abdeckung der Leiterplatte mit Schraubenlöchern zur Durchsteckmontage und Aussparungen für sämtliche Elemente der Mensch-Maschine-/ Maschine-Maschine Schnittstelle .....	8
Abbildung 9: Explosionsdarstellung des montierten Lüfters und seiner Aufnahme .....	9
Abbildung 10: Abdeckung des Lüfters mit Polygonmuster für die Luftzufuhr. ....	9
Abbildung 11: Taster, als Einzeldarstellung links und rechts im Gehäuse eingebaut als Schnittdarstellung .....	10
Abbildung 12: Montiertes Gehäuse, links und Explosionszeichnung rechts.....	11

## Verweise

- [1] Vishay General Semiconductor, Low V<sub>F</sub> Single-Phase In-Line Bridge Rectifiers, Malvern, Pennsylvania: Vishay Interrechnology Inc., 2023.
- [2] Infineon Technologies AG, „Control Integrated Power System (CIPOS) IKCM20L60GA Datasheet,“ Infineon Technologies AG, München, 2017.
- [3] Fischer Elektronik GmbH & Co.KG, „www.fischerelektronik.de,“ 18 01 2024. [Online]. Available: [https://www.fischerelektronik.de/web\\_fischer/de\\_DE/\\$catalogue/fischerData/PR/SK507\\_/datasheet.xhtml?branch=K%C3%BChlk%C3%B6rper](https://www.fischerelektronik.de/web_fischer/de_DE/$catalogue/fischerData/PR/SK507_/datasheet.xhtml?branch=K%C3%BChlk%C3%B6rper). [Zugriff am 18 Januar 01].
- [4] Fischer Elektronik GmbH & Co.KG, „www.fischerelektronik.de,“ 18 01 2024. [Online]. Available: [https://www.fischerelektronik.de/web\\_fischer/de\\_DE/\\$catalogue/fischerData/PR/SK507\\_/datasheet.xhtml?branch=K%C3%BChlk%C3%B6rper](https://www.fischerelektronik.de/web_fischer/de_DE/$catalogue/fischerData/PR/SK507_/datasheet.xhtml?branch=K%C3%BChlk%C3%B6rper). [Zugriff am 18 01 2024].
- [5] Fischer Elektronik GmbH & Co. KG, „www.fischerelektronik.de,“ 2022. [Online]. Available: [https://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/technischeerlaeuterungen\\_d.pdf](https://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/technischeerlaeuterungen_d.pdf). [Zugriff am 05 11 2023].