

Bachelorarbeit

**Retrofit eines modernen Luftmassenmessers in
einen Ottomotor mit Bosch L-Jetronic ECU unter
Verwendung eines Mikrocontrollers**

Vorgelegt von:

Hans Wilhelm Zeuschner

Matr. Nr.: 7012492

Studiengang:

Elektrotechnik im Praxisverbund

Betreuer:

Prof. Dr. Carsten Koch

Zweitprüfer:

Ewald Zimmermann B. Eng.

Erklärung

Die vorliegende Arbeit enthält keine vertrauliche / kommerziell nutzbare Informationen, deren Rechte außerhalb der Hochschule Emden/Leer liegen.

Soweit meine Rechte berührt sind, erkläre ich mich einverstanden, dass die vorliegende Arbeit Angehörigen der Hochschule Emden/Leer für Studium / Lehre / Forschung uneingeschränkt zugänglich gemacht werden kann.

Eidesstattliche Versicherung

Ich, der Unterzeichnende, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben. Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Ort, Datum, Unterschrift

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, zu ermöglichen, nicht länger produzierte mechanische Luftmengenmesser mit modernen und in aktiver Produktion befindlichen elektronischen Luftmassenmessern zu ersetzen. Eingesetzt werden diese Sensoren in Ottomotoren mit Benzineinspritzung, um ein optimales Gemisch aus Kraftstoff und Luft zu erreichen, welches eine möglichst effiziente Verbrennung gewährleistet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein primär mechanisch arbeitender Luftmengenmesser, der am Motorsteuergerät eines L-Jetronic-Systems des Herstellers Bosch angeschlossen wird, ersetzt. Das in dieser Arbeit entwickelte System wurde exemplarisch für das Fahrzeug BMW E24 635 CSi entworfen. Es ist jedoch generell an diverse Fahrzeuge aus den Jahren 1973 bis ca. 1981 verschiedener Hersteller mit L-Jetronic adaptierbar.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine flexible Mikrocontrollersteuerung mit individueller Hard- und Software entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

Rechtliche Erklärung	III
Kurzfassung	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1 Ottomotor	4
2.2 Saugrohreinspritzung	4
2.3 Bosch L-Jetronic Einspritzsystem	5
2.4 Bosch L-Jetronic Motorsteuergerät	6
2.5 Klassischer Luftmengenmesser	7
2.6 Moderner Heißfilm-Luftmassenmesser	8
3 Umsetzung	11
3.1 Funktionsprinzip des LMM-Retrofits	11
3.2 Konzept für die Umsetzung	14
3.3 Messdatenaufnahme	17
3.3.1 Messungen der LMM-Sensoren	17
3.3.2 Kennlinienaufnahme der NTC-Thermistoren	22
3.3.3 Interpretation der Messergebnisse	24
3.3.3.1 Luftmessung	24
3.3.3.2 Thermistoren	24
3.4 Datenkorrelation und Kennlinienbestimmung mittels Regression	25
3.5 Schaltungsentwicklung	31
3.6 Bauteilselektion	31
3.7 Schaltplandesign	33
3.7.1 Mikrocontroller	34
3.7.1.1 Reset-Taster und externer Reset	35
3.7.1.2 Programmierung und Debugging	35
3.7.1.3 Ein- und Ausgabemöglichkeiten für den Nutzer	36
3.7.1.4 Testpunkte	37
3.7.2 Lokale Spannungsversorgung	38
3.7.3 USB-zu-UART-Bridge	39
3.7.4 Interface zum Auto und dem elektronischen LMM	41
3.7.4.1 NTC-Thermistor	43
3.7.4.2 Bestimmung des optimalen Teilerwiderstands	43
3.7.4.3 Schaltung zur Nachbildung des Luftmengensignals	46
3.7.4.4 Digitalpotentiometer zur NTC-Nachbildung	48
3.7.4.5 Relais für Schaltkontakt mech. LMM	52
3.7.4.6 Versorgungsspannungsmessung	53

3.7.4.7	Testpunkte für Sensorsignale	54
3.7.5	Mechanische Elemente	55
3.8	Platinenlayout	56
3.8.1	Allgemeines	56
3.8.2	Kupferlagen der Platine	57
3.8.3	3D-Render der Platine	60
3.8.4	Mikrocontroller und unterstützende Bauteile	62
3.8.5	Lokale Spannungsversorgung	64
3.8.6	Anschlüsse an das Fahrzeug und den elektronischen LMM	66
3.8.6.1	Relais	68
3.8.6.2	Auswahlschalter NTC-Verbindung	68
3.8.7	Nachbildung der Sensorsignale	69
3.8.8	USB-zu-UART-Brücke	71
3.9	Platinenbestückung	73
3.10	Firmwareentwicklung	75
3.10.1	Dokumentation des Quellcodes	75
3.10.2	Firmware des Mikrocontrollers	76
3.10.2.1	Entwicklung eines Testprogramms	77
3.10.2.2	Hauptprogramm für die Kennlinienwiedergabe	78
3.11	Gehäusedesign	86
4	Bewertung der Ergebnisse	89
4.1	Bewertung der Firmware	89
4.1.1	Kennlinienwiedergabe	89
4.1.2	Firmware-Laufzeitmessung	92
4.2	Bewertung der Platine	94
4.2.1	Elektrische Robustheit	94
4.2.2	Temperaturmessung mit NTC	95
5	Schlusswort und Ausblick	97
	Literaturverzeichnis	VII
6	Anhang	IX
6.1	Ausgabe des Testprogramms	IX
6.2	Schaltplan LMM-Retrofit	X
6.3	Schaltplan Triumph TR7 Motorsteuergerät	XVI
6.4	Bauteilliste	XX

Abbildungsverzeichnis

1	Komponenten der L-Jetronic	5
2	Bosch L-Jetronic Motorsteuergerät	6
3	Luftmengenmesser (Luftseite)	7
4	Luftmengenmesser (Anschlussseite)	7
5	Heißfilm-Luftmassenmesser	9
6	Bosch HFM 5 Luftmassenmesser	9
7	Blockschaltbild: Einsatz im Fahrzeug	12
8	Blockschaltbild: Vorgehen bei der Softwareentwicklung	13
9	Schaltplan des Steuergeräts des Triumph TR7	15
10	Schaltplan des mechanischen Luftmengenmessers	15
11	Messaufbau Rohdatenaufnahme mit 3D-gedruckten Teilen	17
12	Verbindungsstück zwischen dem el. und mech. LMM	18
13	Verbindungsstück zum Anschluss der Staubsauger an den el. LMM	18
14	Übertragung der Messdaten mittels UART auf den PC	19
15	Messaufbau: Rohdatenaufnahme mit Arduino Nano	20
16	Oszilloskopaufnahme der LMM-Rohdaten	20
17	Rohe Messdaten (Luftmenge bzw. Luftmasse)	21
18	Kennlinie des NTC-Thermistors im HFM 5	22
19	Widerstände der NTCs in Abhängigkeit von der Temperatur	23
20	Abweichung der Widerstände der NTCs	23
21	Screenshot der Entwicklungsumgebung Visual Studio Code	25
22	Messdaten vor der Bereinigung	27
23	Messdaten nach der Bereinigung	27
24	Messdaten mit linearer Regression	28
25	Messdaten mit Regression 2. Grades	29
26	Messdaten mit Regression 2. Grades, angepasst an ADC-Messung	30
27	Übersicht Schaltplan	33
28	Anschlüsse am Mikrocontroller	34
29	Reset Taster und externer Reset über \overline{DTR} oder \overline{RTS}	35
30	UART- und ICSP-Header	36
31	Taster für Benutzereingaben	36
32	Softwaregesteuerte LEDs	37
33	Testpunkte Mikrocontroller	37
34	5 V Linearregler	38
35	Simulation des Filters der Versorgungsspannung	38
36	USB-zu-UART-Brücke	40
37	Stecker zum Motorsteuergerät	41
38	Stecker zum elektronischen Luftmassenmesser	42
39	Wahlschalter Thermistor	43
40	Äquivalente Thermistor-Messschaltung	43
41	Tabelle zur Ermittlung des optimalen Werts für R1	44
42	Funktionsgraph mit optimalem Wert für R1	45
43	Funktionsgraph mit suboptimalem Wert für R1	45
44	DAC und OPV zur Nachbildung des Luftmengensignals	47

45	Schaltung zur Nachbildung des NTC-Thermistors	49
46	Bestimmung einer Funktionsgleichung für den NTC-Thermistor .	49
47	Berechnung der Auflösung der Nachbildung des NTC-Thermistors	50
48	Funktionsgraph für eine Auflösung von 256 Stufen	51
49	Funktionsgraph für eine Auflösung von 1024 Stufen	51
50	Relais für Schaltkontakt der Klappe des mechanischen LMMs . .	52
51	Spannungsteiler zur Messung der Versorgungsspannung	53
52	Testpunkte: Interface zum Auto und dem elektronischen LMM . .	54
53	Montagelöcher	55
54	3D-Render der Platine mit Raytracing	56
55	Oberste Kupferlage mit Ground-Fill	57
56	Oberste Kupferlage ohne Ground-Fill	58
57	Unterste Kupferlage ohne Ground-Fill	58
58	Interne Kupferlage 1 mit Ground-Fill	59
59	Interne Kupferlage 2 mit Ground-Fill	59
60	Oberseite der bestückten Platine	60
61	Oberseite der unbestückten Platine	61
62	Unterseite der Platine	61
63	Mikrocontroller und unterstützende Bauteile markiert	62
64	Mikrocontroller-Layout im Detail	63
65	Lokale Spannungsversorgung markiert	64
66	Linearregler-Layout im Detail	65
67	Struktur der Spannungsversorgung markiert	65
68	Anschlüsse an das Fahrzeug und den el. LMM markiert	66
69	Pin für den alternativen Anschluss an das Fahrzeug und den el. LMM	67
70	Footprint des Steckers zum Motorsteuergerät	67
71	Relais markiert	68
72	Auswahlschalter für die NTC-Verbindung markiert	68
73	DAC und OPV markiert	69
74	Digitalpotentiometer markiert	69
75	Layout des DACs und OPVs markiert	70
76	Layout des Digitalpotentiometers	70
77	USB-zu-UART-Brücke markiert	71
78	Layout der USB-zu-UART-Brücke	72
79	Nahaufnahme der unbestückten Platine	73
80	Schablone zum Aufbringen der Lötpaste	73
81	Unbestückte Platine in Halterung	73
82	Bestückte aber noch nicht verlötete Platine	73
83	Temperaturkurve des Reflow-Ofens	74
84	Vollständig bestückte Platine	74
85	Nahaufnahme der vollständig bestückten Platine	74
86	Screenshot der durch Doxygen generierten Dokumentation	75
87	Screenshot der Entwicklungsumgebung: Platform IO IDE	76
88	Call-Graph der <i>setup()</i> -Methode	78
89	Ruhezustand, ohne Kompensation	81
90	Ausschaltmoment, ohne Kompensation	81

91	Ausschaltmoment, mit Kompensation aber ohne Hysterese	81
92	Ausschaltmoment, mit Kompensation und aktiver Hysterese . . .	81
93	Offsets bei der Kennlinienwiedergabe	81
94	Bitmuster des DAC-Konfigurationsregisters	83
95	Interface der CAD-Software	86
96	Parameter des 3D-Designs	86
97	Render des Gehäusedesigns	87
98	3D-gedrucktes Gehäuse	87
99	Änderung der Versorgungsspannung (Kanal 4 (blau))	90
100	Modulation des Luftstroms bei konstanter Versorgungsspannung .	90
101	Ausgangssignale des mech. und el. LMMs	91
102	Originalgetreue Wiedergabe der Kennlinie	91
103	Laufzeitmessung für 1000 Durchläufe	93

Abkürzungsverzeichnis

TVS Transient Voltage Suppression

ESD Electrostatic Discharge

PKW Personenkraftwagen

TX Transmit

RX Receive

SRAM Static Random Access Memory

USB Universal Serial Bus

AEC Automotive Electronics Council

LMM Luftmassen- bzw Luftmengenmesser

CAD Computer Aided Design

HFM Heißfilm-Luftmassenmesser

NTC Negative Temperature Coefficient

SMD Surface Mounted Device

THT Through Hole Technology

NPN Negativ-Positiv-Negativ

LED Light Emitting Diode

TVS Transient Voltage Suppressor

PTC Positive Temperature Coefficient

EMV Elektromagnetische Verträglichkeit

IC Integrated Circuit

ADC Analog to Digital Converter

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

GPIO General Purpose Input / Output

IO Input / Output

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

ICSP In Circuit Serial Programming

HAL Hardware Abstraction Layer

IDE Integrated Development Environment

PC Personal Computer

HTML HyperText Markup Language

DAC Digital to Analog Converter

OPV Operationsverstärker

CSV Comma Separated Values

MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

1 Einleitung

Das einleitende Kapitel dient dazu, dem Leser zu verdeutlichen, weshalb die Notwendigkeit für die Entwicklung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Systems besteht. Außerdem wird die genau Aufgabenstellung dargelegt und ein Überblick zum Aufbau und der Struktur der Ausarbeitung gegeben.

Im folgenden Text werden die Begriffe elektronischer LMM und mechanischer LMM stellvertretend für den modernen Luft*massen*messer und den alten, primär mechanisch arbeitenden, Luft*mengen*messer verwendet.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System wird mit LMM-Retrofit bezeichnet. Dieses System umfasst eine elektronische Schaltung inklusive Mikrocontroller und Firmware.

1.1 Motivation

Ab den 1970er-Jahren kamen sukzessive immer mehr Personenkraftwagen (PKW) mit einer Benzineinspritzung auf den Markt. Zunächst waren diese im Premiumsegment angesiedelt. Ab Mitte der 1960er-Jahre bot der Hersteller Bosch erste analog-elektronisch gesteuerte Systeme für die Benzineinspritzung in Ottomotoren an.

Das von Bosch entwickelte L-Jetronic-System für die elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung in PKW ging im Jahre 1973 in die Massenproduktion und wurde im Jahre 1981 vom LH-Jetronic System etappenweise abgelöst. Diese Systeme fanden Einsatz in den Fahrzeugen zahlreicher deutscher und internationaler Hersteller. (vgl. [7], S. 118)

Laut aktueller EU-Richtlinie sind Hersteller lediglich sieben Jahre nach Produktionsende weiterhin verpflichtet, Ersatzteile liefern zu müssen (vgl. [6]). Dies trifft auch auf die Automobilbranche zu. Lange Zeit gab es in dieser Hinsicht gar keine Regelungen.

Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen, beispielsweise auch im Fall der in BMW-PKW verbauten, zur L-Jetronic gehörenden, Luftmengenmesser von Bosch ist nicht mehr gegeben. Die Preise für ein funktionstüchtiges Gebrauchtteil, wie zum Beispiel den LMM mit der Teilenummer „0280203002“, liegen bei gängigen Online-Plattformen bei ca. 200 € ¹ (new old stock: ca. 590 € ²). Da es sich um mitunter über 40 Jahre alte, gebrauchte mechanische Komponenten handelt, ist nicht gewährleistet, dass diese ohne Probleme über längere Zeit funktionieren. Der Preis für unbenutzte Originalteile ist vergleichsweise hoch.

Das grundlegende Prinzip der Ottomotorsteuerung ist gleich geblieben, jedoch werden in modernen Fahrzeugen Luftmassenmesser verbaut. Diese werden von diversen Zulieferern zu geringen Stückkosten in großer Stückzahl hergestellt und vertrieben. Die Preise für einen elektronischen LMM liegen je nach Fahrzeug zwischen 30 € und 130 € ³.

¹Angebot auf ebay.de, Stand: Juli 2022

²Angebot auf ebay.de, Stand: Juli 2022

³exemplarisch: Bosch Heißfilm-Luftmassenmesser (HFM) 5, Stand Juli 2022

Da die Technologie in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt wurde, ist es nicht möglich, einen modernen LMM direkt in einem Oldtimer zu verbauen.

Der Einbau von modernen elektronischen LMM in Verbindung mit dem LMM-Retrofit bietet zwei maßgebliche Vorteile. Zum einen wären die Besitzer der Fahrzeuge nicht auf einen schwindenden Vorrat an Originalteilen angewiesen und zum anderen würden die Kosten für den Tausch eines defekten Teils sinken.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine elektronische Schaltung und dazugehörige Software zu entwickeln (LMM-Retrofit-System).

Das LMM-Retrofit ermöglicht es, einen mechanischen Luftmengenmesser, der Teil des Benzineinspritzsystems mit Bosch L-Jetronic Motorsteuergerät ist, durch einen modernen, elektronischen Luftmassenmesser zu ersetzen.

Über eine zuvor aufgenommene Kennlinie und den daraus berechneten Koeffizienten soll das LMM-Retrofit-System in der Lage sein, das Signal des mechanischen LMMs auf Basis der Messwerte, die vom elektronischen LMM stammen, originalgetreu und programmierbar nachzubilden.

Die Programmierbarkeit soll durch eine für den Benutzer leicht zu benutzende Schnittstelle zu einem Rechner gewährleistet werden.

Außerdem soll die LMM-Retrofit-Platine Taster besitzen, mithilfe derer rudimentäre Einstellungen an der programmierten Kennlinie vorgenommen werden können.

Auch alle weiteren Aspekte des mechanischen LMMs sollen vollständig von dem LMM-Retrofit nachgebildet werden. Hierzu zählen ein NTC-Thermistor, ein Schaltkontakt, eine Diode und ein einstellbarer Luft-Bypass-Offset.

Die Schaltung und die Kennliniennachbildung sollen im Labor verifiziert werden. Die Erprobung an einem realen Fahrzeug und die Behebung von dabei festgestellten Problemen oder weiteren nötigen Verbesserungen sind aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im Kapitel 2 der technische Hintergrund der Arbeit erläutert. Die technischen Hintergrundinformationen bilden die Grundlage für das Verständnis dieser Arbeit.

Im Kapitel 3 wird der Entwicklungsprozess von der Konzeption (siehe Abschnitt 3.2) bis zur fertigen Platine (siehe Abschnitt 3.9) und der Programmierung (siehe Abschnitt 3.10) beschrieben.

Finalisiert wird die Arbeit mit einer Reihe von Messungen, die die Performance der Entwicklung beurteilen lassen (siehe Kapitel 4). Auf Basis der Ergebnisse wird im Kapitel 5 ein abschließender Ausblick gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Ziel dieses Kapitels ist, die nötigen Grundlagen zu vermitteln, die für ein Verständnis dieser Arbeit nötig sind. Dabei werden primär die elektrotechnischen Aspekte der vorgestellten Komponenten betrachtet.

Diese Arbeit baut in Teilen auf eine vorherige studentische Praxisphasenarbeit auf. In der studentischen Arbeit wurde die Umsetzung der Nachbildung des mechanischen LMMs unter Verwendung eines digitalen Potentiometers evaluiert. Das Ergebnis zeigte, dass dies unter Laborbedingungen möglich war. Die Arbeit beschränkte sich auf die Betrachtung des elektronischen LMMs und der Ausgabe eines Widerstandswerts mittels Digitalpotentiometer. Es wurde mit einem Arduino-Entwicklerboard und mit Modulen gearbeitet, die über Steckverbindungen miteinander verbunden wurden. Eine Wiedergabe der tatsächlichen Kennlinie, die zuvor aus einer Messung errechnet wurde, ist nicht implementiert worden. Primärer Fokus der Arbeit war die Programmierung von der Firmware für die Inbetriebnahme der Komponenten, wie zum Beispiel dem Digitalpotentiometer. (vgl. [16])

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden einige Konzepte der Praxisphasenarbeit aufgegriffen, hinsichtlich der Umsetzbarkeit bewertet und praktisch nutzbar gemacht.

2.1 Ottomotor

Ein Ottomotor ist ein Verbrennungsmotor, der die im Kraftstoff Benzin enthaltene chemische Energie in kinetische Energie umwandelt (vgl. [7], S. 6). „Die Kraftstoffzuführung erfolgte bis zu Beginn dieses Jahrtausends in der Regel in das Saugrohr. (...) Die neue Generation von Ottomotoren arbeitet mit Direkteinspritzung“ ([7], S. 6). Die im Rahmen dieser Arbeit thematisierte L-Jetronic Einspritzanlage arbeitet mit einer Saugrohreinspritzung. Die Direkteinspritzung stellt eine Weiterentwicklung der Saugrohreinspritzung dar (vgl. [7], S. 6). Da diese nicht Teil des behandelten L-Jetronic-Systems ist, wird diese nicht näher behandelt.

2.2 Saugrohreinspritzung

Die Saugrohreinspritzung gehört zu den Systemen mit sog. äußerer Gemischbildung. Das Luft-Kraftstoff-Gemisch wird im Saugrohr des Motors gebildet (vgl. [7], S. 12). Maßgebliche Gründe, weshalb ein Ottomotor mit Einspritzung einem Motor mit einfachem Vergaser überlegen ist, sind:

- Leistungssteigerung: Motoren mit Einspritzung können mehr Leistung bringen und das Drehmoment steigt (vgl. [4], S. 19)
- Sparsamkeit: der Kraftstoffverbrauch kann durch ein Einspritzsystem gesenkt werden, ohne dass Leistungseinbußen auftreten (vgl. [7], S. 115)
- Verringerung der Schadstoffemissionen durch genaue Einhaltung des Luft zu Kraftstoff-Verhältnisses (vgl. [7], S. 115)

2.3 Bosch L-Jetronic Einspritzsystem

Die Abb. 1 zeigt die Bestandteile, die zum L-Jetronic Benzineinspritzsystem gehören. Maßgeblich für diese Arbeit sind das Steuergerät (2) und insbesondere der Luftmengenmesser (1), der ersetzt werden soll. In den Folgeabschnitten 2.4 und 2.5 werden diese genauer behandelt. Die weiteren aufgelisteten Komponenten (3 bis 11) haben keine Relevanz für die technische Umsetzung dieser Arbeit.

1. Luftmengenmesser
2. Steuergerät
3. Kraftstofffilter
4. Elektrokraftstoffpumpe
5. Kraftstoffdruckregler
6. Zusatzluftschieber
7. Thermozeitschalter
8. Temperatursensor
9. Drosselklappenschalter
10. Kaltstartventil
11. Einspritzventile

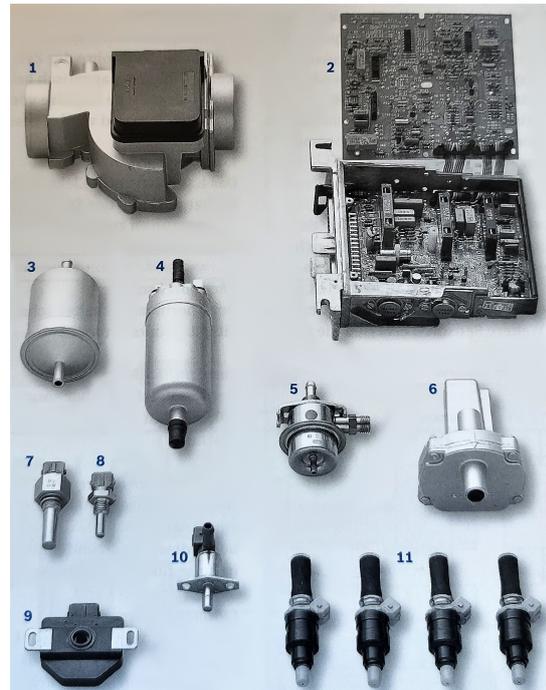


Abbildung 1: Komponenten der L-Jetronic (vgl. [7], S. 134)

2.4 Bosch L-Jetronic Motorsteuergerät

Das Motorsteuergerät erfasst die vom Luftmengenmesser gemessene Luftmenge, welche die Grundlage für die einzuspritzende Benzinmenge darstellt (vgl. [7], S. 138). Aus den Messdaten, zu denen außer dem Luftmengensignal noch „Angaben über die Kühlmittel- beziehungsweise Zylinderkopftemperatur, Stellung der Drosselklappe, den Startvorgang sowie über Motordrehzahl und Einspritzzeitpunkt“ ([7], S. 141) gehören, bildet das Steuergerät Steuerimpulse für die Einspritzventile. (vgl. [7], S. 141)

Auf der Abb. 2 sind die Platine und Bauteile des Motorsteuergeräts zu sehen.

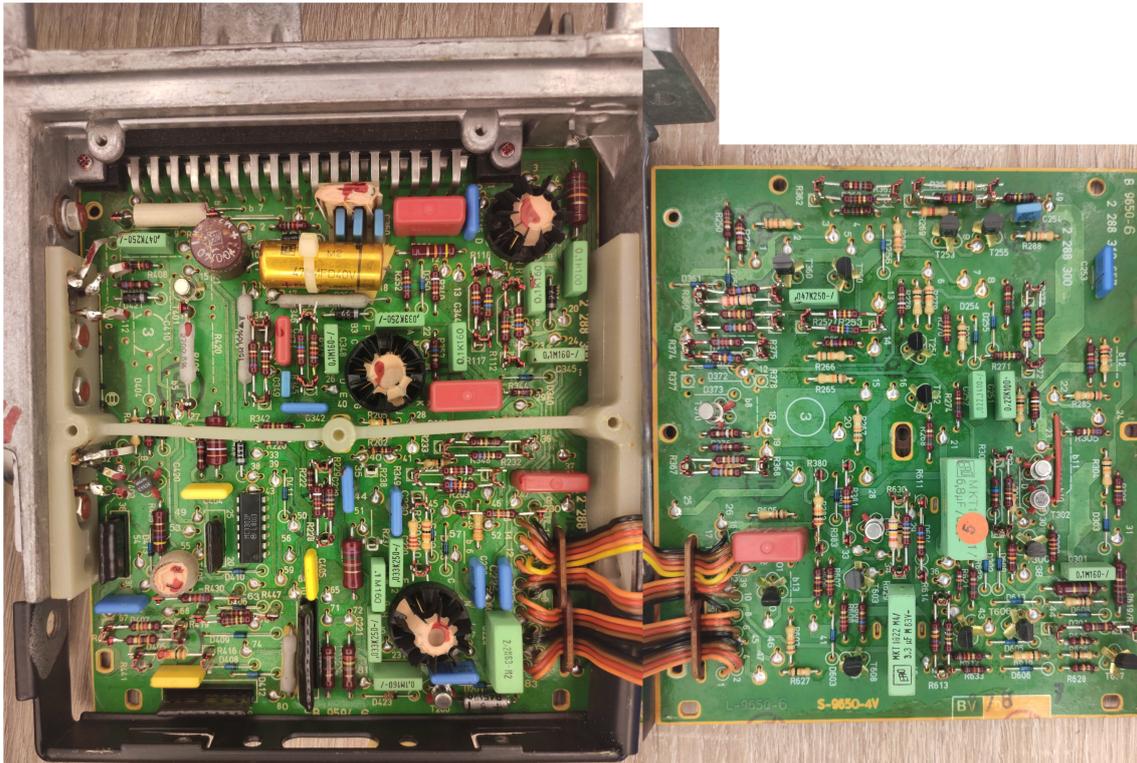


Abbildung 2: Bosch L-Jetronic Motorsteuergerät

2.5 Klassischer Luftmengenmesser

Der vorwiegend mechanisch arbeitende Luftmengenmesser erfasst die vom Motor angesaugte Luftmenge und gibt ein entsprechendes Analogsignal an das Motorsteuergerät aus (vgl. [7], S. 138).

Im Luftmengenmesser befindet sich eine bewegliche Stauklappe, die durch eine Feder im Ruhezustand an einer definierten Position gehalten wird (siehe Abb. 3) (vgl. [7], S. 139).

Durch den Luftstrom wird die Klappe im Luftmengenmesser auf einer Winkelstellung gehalten. An der Klappe ist der Schleifer eines Potentiometers fixiert (siehe Abb. 4). Je nach Klappenstellung ändert sich somit die Einstellung des Potentiometers. (vgl. [7], S. 139)

Ein Bypass ermöglicht es, dass eine kleine Luftmenge die Stauklappe umgeht. Die Einstellung des Bypass wird für die Einstellung des Gemischverhältnisses im Leerlauf verwendet. (vgl. [7], S. 139)

1. Kompensationsklappe
2. Dämpfungsvolumen
3. Bypass
4. Stauklappe
5. Leerlaufgemisch-Einstellschraube

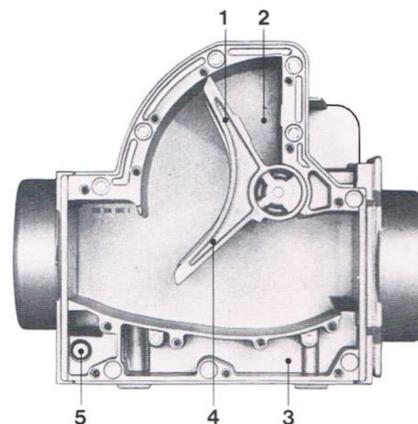


Abbildung 3: Luftmengenmesser (Luftseite) (vgl. [7], S. 140)

1. Zahnkranz für die Federvorspannung
2. Rückholfeder
3. Schleiferbahn
4. Keramikplatte mit Widerständen und Leitungszügen
5. Schleiferbahnabgriff
6. Schleifer
7. Pumpenkontakt

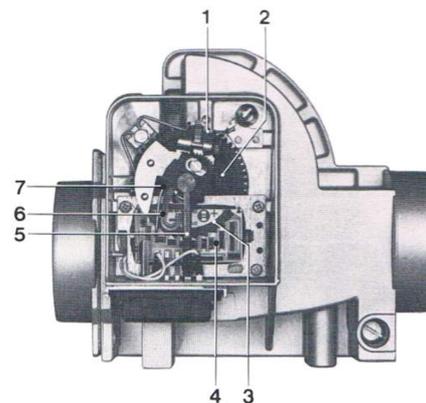


Abbildung 4: Luftmengenmesser (Anschlussseite) (vgl. [7], S. 140)

2.6 Moderner Heißfilm-Luftmassenmesser

Die modernen, elektronisch arbeitenden Sensoren basieren auf einem anderen Messprinzip und erfassen die tatsächlich angesaugte Luftmasse und nicht etwa die Luftmenge (vgl. [7], S. 138; [15], S. 120).

Der HFM arbeitet nach einem thermischen Messprinzip. Im HFM ist ein mikro-mechanisches Sensorelement integriert (siehe (3) auf Abb. 5). In der Mitte dieser Sensor-Membran befindet sich ein Heizbereich. Über einen Heizwiderstand und einen Temperaturfühler für die Ansaugluft wird dieser auf eine Temperatur geregelt, die ca. 100 K höher ist als die angesaugte Luft. Wenn keine Luftströmung existiert, so ist das Temperaturgefälle ausgehend vom mittig angebrachten Heizelement zu den Rändern des Sensorelements gleich. Stromauf und stromab vom Heizwiderstand sind zwei weitere Temperaturfühler symmetrisch angebracht. Diese Fühler messen die gleiche Temperatur, wenn kein Luftstrom existiert. Sofern ein Luftstrom existiert, wird der stromauf liegende Temperaturfühler abgekühlt und der stromab liegende Fühler behält seine Temperatur näherungsweise bei. Die Temperaturdifferenz, die in Betrag und Richtung von der Anströmung abhängt, wird von einer Messbrücke erfasst. Diese Spannung repräsentiert die Luftmasseninformation. Das auf der Abb. 5 dargestellte Messelement ist im Rohr integriert, in das es hineinragt. Je nach Hubraum bzw. Luftverbrauch des Motors besitzt dieses Rohr einen größeren oder kleineren Durchmesser. (vgl. [15], S. 120 - 121)

Die Abb. 6 zeigt den Aufbau mit Rohr und dem ins Rohr ragenden Sensorelement.

1. elektrische Anschlüsse (Stecker)
2. Auswertelektronik
3. Sensorelement
4. Sensorgehäuse
5. Messkanal

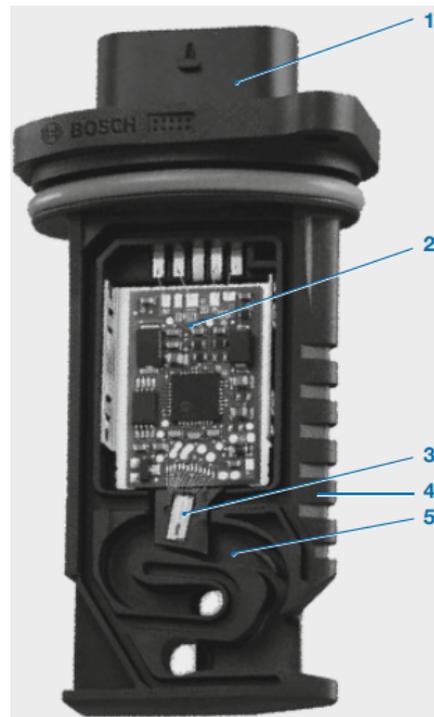


Abbildung 5: Heißfilm-Luftmassenmesser (vgl. [15], S. 121)



Abbildung 6: Bosch HFM 5 Luftmassenmesser (vgl. [9], S. 1)

3 Umsetzung

Der Abschnitt 3.1 dient dazu, einen Überblick über die grundlegende Umsetzung des fertigen LMM-Retrofits zu vermitteln. Dieses Basisverständnis erleichtert das Verständnis der folgenden Abschnitte und Kapitel.

Im Anschluss wird die Entwicklung eines Konzeptes für die technische Umsetzung der Nachbildung des mechanischen LMMs betrachtet.

In den nachfolgenden Abschnitten wird detailliert auf die einzelnen Entwicklungsetappen eingegangen. Diese umfassen die Aufnahme und Auswertung von Messdaten beider LMM (siehe Abschnitt 3.3 und 3.4), die Schaltungsentwicklung (siehe Abschnitt 3.5), das Layout und Bestücken der Platine (siehe Abschnitt 3.8 und 3.9), die Programmierung der Firmware (siehe Abschnitt 3.10) sowie das Design eines Gehäuses (siehe Abschnitt 3.11).

3.1 Funktionsprinzip des LMM-Retrofits

Das Blockschaltbild (siehe Abb. 7) verdeutlicht den Aufbau, wenn das LMM-Retrofit-System im Fahrzeug zum Einsatz kommt. Zwecks vereinfachter Lesbarkeit wurden nur die relevanten Signale auf dem Blockschaltbild abgebildet.

Das LMM-Retrofit wird an den elektronischen LMM angeschlossen, welcher anstelle des alten mechanischen LMMs im Ansaugsystem des Oldtimers eingebaut wird. Das neue LMM-Retrofit-System ist über den Stecker, der zuvor am mechanischen LMM angeschlossen war, mit dem Motorsteuergerät verbunden. Die neue Elektronik wird vom Fahrzeug mit 12 V versorgt.

Der elektronische LMM erfasst die vom Motor angesaugte Luftmasse und gibt ein entsprechendes Analogsignal aus. Dieses wird vom Mikrocontroller abgetastet. Das Ausgangssignal des el. LMMs wird mit Hilfe einer zuvor messtechnisch bzw. mathematisch bestimmten Kennlinie (siehe Kapitel 3.4) auf ein passendes Ausgangssignal umgerechnet. Dieses wird an das Motorsteuergerät ausgegeben („Sig“ im Blockschaltbild 7). Zu diesem Zweck ist auf der Platine eine Ausgangsstufe mit Digital to Analog Converter (DAC) und Operationsverstärker (OPV) vorhanden, die die Pegelanpassung vornimmt. Die Referenzspannung des DACs wird von der Versorgungsspannung mittels eines Spannungsteilers abgeleitet. Dies wahrt stets den Bezug der Ausgangsspannung des LMM-Retrofits zur Fahrzeugspannung. Zusätzlich zum Signal „Sig“ existiert außerdem das „Tap“-Signal. Dieses wird über einen einfachen Spannungsteiler generiert. Anhand der beiden Signale „Tap“ und „Sig“ nimmt das Motorsteuergerät entsprechende Anpassungen an der Treibstoffeinspritzung vor.

Die Temperatur der angesaugten Luft wird sowohl im elektronischen als auch im mechanischen LMM mittels eines Negative Temperature Coefficient (NTC)-Thermistors erfasst. Das LMM-Retrofit-System kann die Temperatur, die der elektronische LMM misst, erfassen und über ein digitales Potentiometer, erneut anhand einer errechneten Kennlinie, an das Motorsteuergerät ausgeben.

Alternativ kann über das Umlegen eines Schalters ausgewählt werden, dass der NTC des elektronischen LMMs direkt mit dem Motorsteuergerät verbunden wird.

Dies kann in den Fällen erfolgen, in denen eine ausreichend große Ähnlichkeit zwischen den Kennlinien beider Thermistoren (elektronischer und mechanischer LMM)

besteht und somit keine Nachbildung der NTC-Kennlinie nötig ist.
 Das Relais wird vom Mikrocontroller angesteuert und bildet den Schaltkontakt im mechanischen LMM nach.

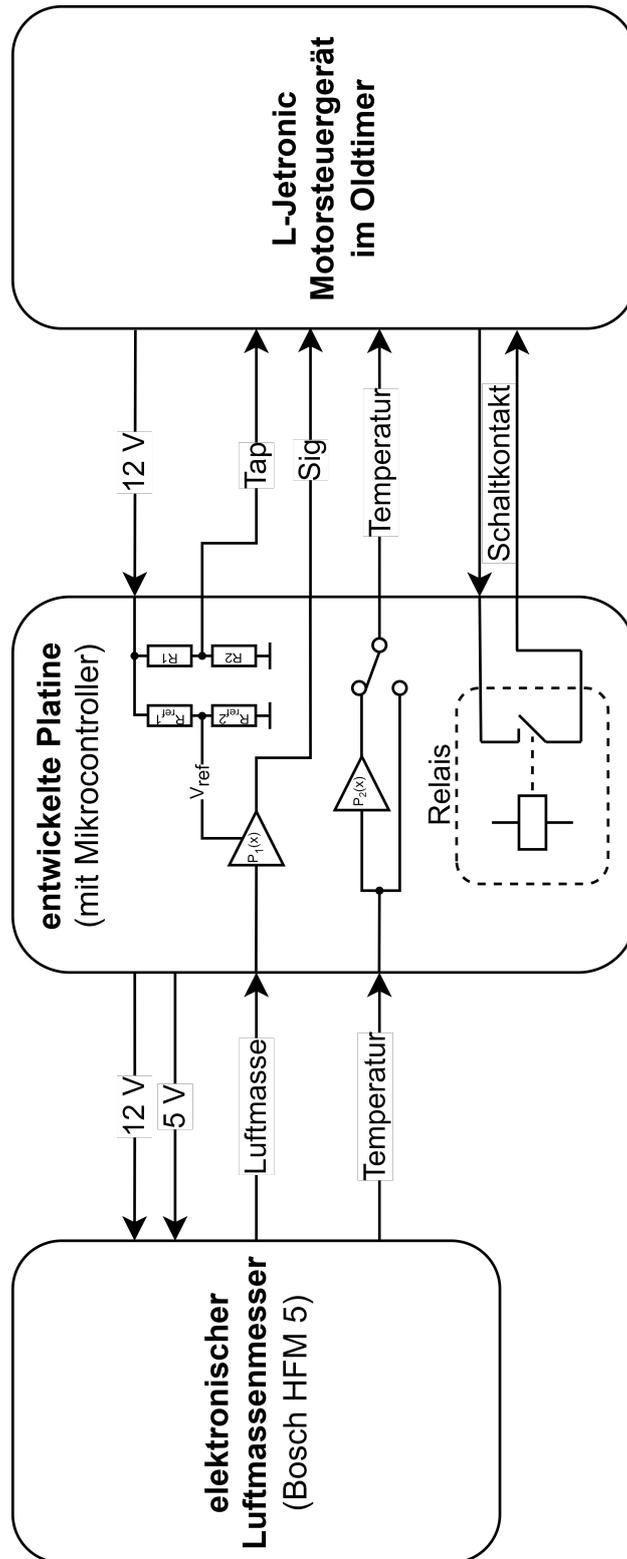


Abbildung 7: Blockschaltbild: Einsatz im Fahrzeug

Die Abb. 8 zeigt, welche Schritte im Kontext der Softwareentwicklung nötig sind für den Betrieb des LMM-Retrofits und eine Kennlinienwiedergabe. Die mit blau markierten vorbereitenden Arbeiten, in Form der Kennlinienbestimmung, werden in Abschnitt 3.4 behandelt. Dabei werden Messdaten beider LMM ausgewertet und ein mathematischer Zusammenhang zwischen den Ausgängen ermittelt. Der Abschnitt 3.10 behandelt die Entwicklung der Firmware (gelb markiert), die auf dem Mikrocontroller ausgeführt wird. Diese Firmware verwendet die zuvor bestimmten Koeffizienten, um kontinuierlich das passende Ausgangssignal zu berechnen.

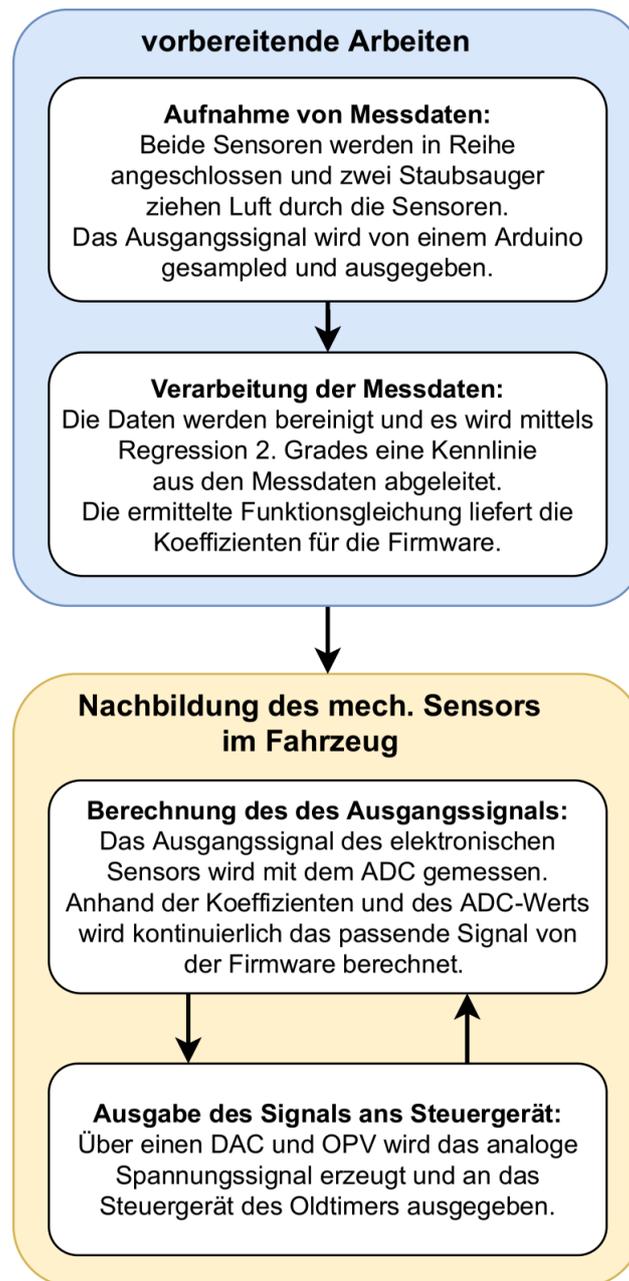


Abbildung 8: Blockschaltbild: Vorgehen bei der Softwareentwicklung

3.2 Konzept für die Umsetzung

Zur Nachbildung der Funktionalität des mechanischen LMMs stehen sowohl die Informationen der Hersteller Bosch und BMW, sowie Schaltpläne eines Steuergeräts zur Verfügung. Diese Schaltpläne wurden von einem Oldtimer-Enthusiasten erstellt. Der grundsätzliche Aufbau des Steuergeräts kann dem Schaltplan entnommen werden. Die Pläne wurden für ein Steuergerät eines Triumph TR7 erstellt (vgl. [19], S. 1). Der Schaltplan wurde erstellt, um eine Reparatur eines defekten Steuergeräts zu vereinfachen.

Sowohl im Triumph TR7, als auch im BMW E24 635 CSi, ist eine L-Jetronic-Benzineinspritzung vom Hersteller Bosch verbaut (vgl. [19], S. 1). Bosch verkaufte das L-Jetronic-Einspritzsystem an zahlreiche Automobilhersteller (vgl. [7], S. 118). Es ist davon auszugehen, dass sich die Systeme in ihrer Grundfunktion sehr stark ähneln. Der Schaltplan stellt die Basis für das Verständnis der Funktionsweise eines L-Jetronic-Steuergeräts dar.

Die Abb. 9 zeigt den relevanten Teil aus dem Schaltplan ([19], S. 1). Der vollständige Schaltplan ist dem Anhang unter Abschnitt 6.3 zu entnehmen. Mit roter Farbe sind die beiden Analogsignale markiert, die der mechanische Luftmengenmesser ausgibt. Diese sollen nachgebildet werden. Mit grün ist die Versorgungsspannung des Fahrzeugs markiert. Die Masseverbindung ist mit blauer Farbe markiert. Die Versorgungsspannung wird über eine Diode und einen niederohmigen Widerstand an den mechanischen Luftmengenmesser ausgegeben. Dieser ist auf Abb. 10 abgebildet. Die Zeichnung des mechanischen Luftmengenmessers wurde aus einer offiziellen Dokumentation des BMW-Kundendienstes entnommen ([5], S. 80).

Die Zeichnung zeigt, dass der mechanische LMM aus einem Potentiometer und einem Festwiderstand besteht. Außerdem sind noch einige weitere Komponenten zu erkennen. Hierzu zählen ein Schaltkontakt, ein Thermistor und eine Diode.

Die Widerstände des Potentiometers und des eingebauten Festwiderstands wurden vermessen und lieferten folgende Ergebnisse:

- Gesamtwiderstand des Potentiometers: 370Ω
- Widerstand zwischen Klemme 8 und 9: 200Ω

Die Schaltpläne 9 und 10 bilden die Basis für folgende Schlussfolgerungen bezüglich der Umsetzung des LMM-Retrofit:

- Da im mech. LMM ein Potentiometer mit einem niedrigen Widerstand verbaut ist, kann es nicht mit einem Digitalpotentiometer nachgebildet werden. Digitalpotentiometer-ICs sind nicht in diesen verhältnismäßig niedrigen Widerstandsbereichen verfügbar. Da nicht genau bekannt ist, wie groß der Messstrom in den IC „HJ11“ (siehe Abb. 9) ist, muss die Impedanz der Schaltung für die Signalnachbildung annähernd identisch mit dem des mech. LMMs sein. Andernfalls könnte das Digitalpotentiometer einem unzulässigen Strom ausgesetzt werden oder die Signalpegel verhalten sich unerwartet. Somit muss der Lösungsansatz aus der Projektarbeit ([16]) verworfen und eine Alternative gefunden werden.
- Alle analogen Signale sind auf die Fahrzeugspannung bezogen bzw. von dieser abhängig. Auch der IC „HJ11“ arbeitet mit dieser Spannung. Daher muss dieser Bezug gewahrt bleiben.
- Der Widerstand zwischen den Klemmen 8 und 9 kann durch einen Widerstand auf der zu entwickelnden Platine nachgebildet werden. Da dieser Widerstand zusammen mit dem Widerstand des Potentiometers einen Spannungsteiler bildet (siehe Abb. 10), muss der Gesamtwiderstand des Potentiometers auf der Platine in Serie geschaltet werden. Somit werden die Eigenschaften des „Tap“-Signals exakt nachgebildet.
- Komponenten, wie die Diode und der Schaltkontakt müssen auch auf der Platine des LMM-Retrofits vorgesehen werden.
- Der NTC-Thermistor muss nachgebildet oder es muss ein äquivalenter Thermistor an das alte Motorsteuergerät angeschlossen werden. Auch wenn im elektronischen LMM ebenfalls ein NTC-Thermistor verbaut ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieser in jedem Fall die selbe Kennlinie besitzt. Der Widerstandsbereich des NTCs im mechanischen LMM wurde mit ca. 100 Ω bis 40 k Ω bestimmt. Dies wurde mit Messungen belegt (siehe Abschnitt 3.3.2). Auf diese wird im Laufe der Arbeit eingegangen. Eine Nachbildung mit einem Digitalpotentiometer ist möglich, da diese in dem relevanten Widerstandsbereich angeboten werden.

Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die Entwicklung.

3.3 Messdatenaufnahme

Vor der Elektronikentwicklung wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt. Die Messdaten der LMM-Sensoren bilden die Basis für die Errechnung einer Kennlinie, um in der Firmware des Mikrocontrollers den passenden LMM-Ausgangswert zu bestimmen.

Da es sich bei den beiden LMM primär um Luftmengen- bzw. Luftmassenmesser handelt, wird zunächst dieser Aspekt messtechnisch betrachtet. Im Anschluss werden zusätzlich die Messungen der NTC-Thermistoren beider LMM diskutiert (siehe Abschnitt 3.3.2).

Die Ergebnisse der Messungen werden im Abschnitt 3.3.3 ausgewertet.

3.3.1 Messungen der LMM-Sensoren

Der Messaufbau für die Messung des LMM-Verhaltens bezüglich der Luftdurchströmung der beiden LMM ist auf Abb. 11 dargestellt. Für die Aufnahme der Kennlinien beider LMM kamen zwei Staubsauger zum Einsatz. Beide Staubsauger verfügen über eine einstellbare Saugleistung. Die Staubsauger zogen die Luft gleichzeitig durch den mechanischen LMM und den elektronischen LMM. Während der Messung waren die LMM in Serie angeschlossen. Somit ist garantiert, dass die Luftmasse, die durch die LMM bewegt wurde, in jedem Fall identisch ist.

Mit dem 3D-CAD Programm Fusion360 des Herstellers Autodesk wurden 3D-Modelle entworfen (siehe Abb. 12 und 13), mithilfe derer die Staubsauger angeschlossen und die beiden LMM in Reihe verbunden werden konnten.



Abbildung 11: Messaufbau Rohdatenaufnahme mit 3D-gedruckten Teilen

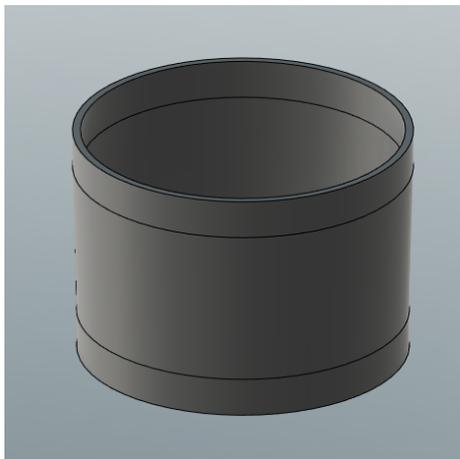


Abbildung 12: Verbindungsstück zwischen dem el. und mech. LMM

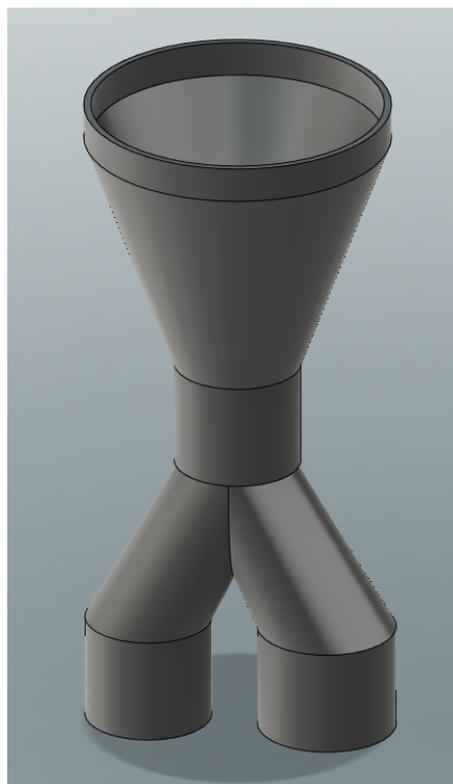


Abbildung 13: Verbindungsstück zum Anschluss der Staubsauger an den el. LMM

Die Messdaten wurden mit einem Arduino Nano aufgenommen. Der interne 10-Bit Analog to Digital Converter (ADC) tastete die Ausgangssignale der beiden LMM ab und gab diese über das Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)-Interface an einen Personal Computer (PC) aus (siehe Abb. 14). Auf diesem wurden die Daten nach Abschluss der Messung in einer Comma Separated Values (CSV)-Datei abgespeichert.

Auf der Abb. 15 ist der Messaufbau inklusive der eben beschriebenen Elektronik abgebildet. Mit einem Labornetzteil wurden 12 V zur Verfügung gestellt. Dieses Netzteil speiste sowohl den elektronischen als auch den mechanischen LMM. Da der elektronische LMM eine zusätzliche Referenzspannung von 5 V benötigt, wurde diese lokal mit einem Linearregler erzeugt. Diese wurde bewusst nicht von der Arduino-Platine abgegriffen, um eine möglichst saubere und störarme Spannung zu erzielen. Der Ausgangspegel des mechanischen LMM lag teilweise über der maximalen Eingangsspannung des ADC, daher wurde die Spannung durch einen Spannungsteiler, bestehend aus hochohmigen Widerständen, reduziert.

Da das Ausgangssignal des elektronischen LMM ein recht starkes Rauschen aufweist, wurde ein Tiefpass aus Widerständen und einem Kondensator verwendet, um hochfrequente Störungen zu entfernen.

Ablauf der Messung:

- Beginn der Messung: Staubsauger 1 und 2 sind ausgeschaltet
- stetiges Erhöhen der Saugleistung des ersten Staubsaugers bis zum Maximum
- Zuschalten des zweiten Staubsaugers auf niedrigster Stufe
- stetiges Erhöhen der Saugleistung des zweiten Staubsaugers bis zum Maximum
- stetiges Reduzieren der Saugleistung des zweiten Staubsaugers bis zum Minimum
- stetiges Reduzieren der Saugleistung des ersten Staubsaugers bis zum Minimum
- Ende der Messung

Mit einem Oszilloskop wurden die Ausgangssignale während des Messvorgangs auf Plausibilität geprüft (siehe Abb. 16).

Erläuterung zur Abb. 16:

Kanal 1 (gelb): mechanischer LMM; Kanal 2 (türkis): elektronischer LMM (gefiltert); Kanal 3 (violett): elektronischer LMM (ungefiltert).

Die gesamten Messdaten, die aus der Messung hervorgehen, sind auf Abb. 17 dargestellt. Im Kapitel 3.4 wird die Ableitung einer Kennliniengleichung aus den Messdaten diskutiert.

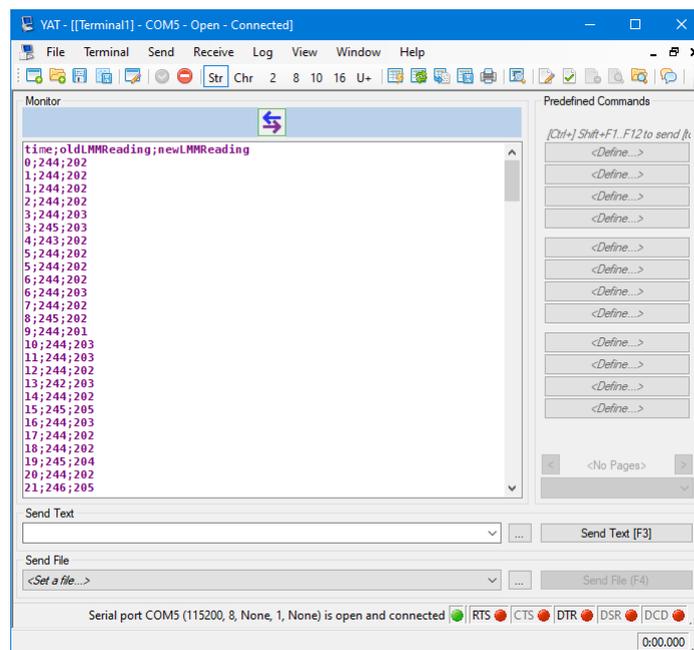


Abbildung 14: Übertragung der Messdaten mittels UART auf den PC

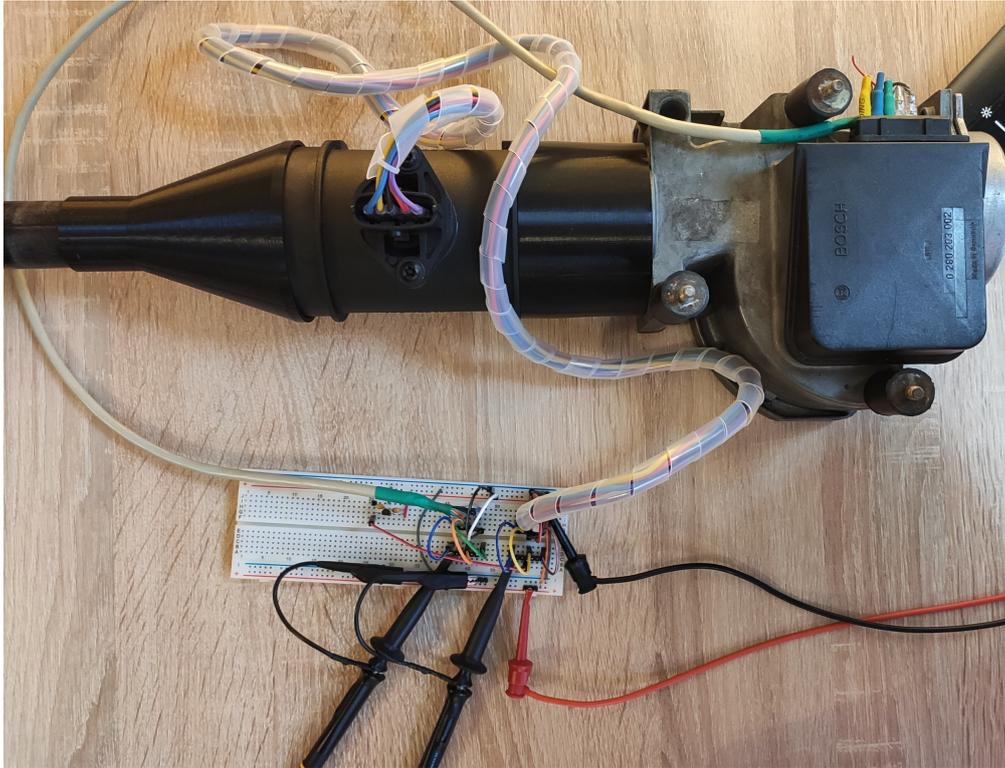


Abbildung 15: Messaufbau: Rohdatenaufnahme mit Arduino Nano



Abbildung 16: Oszilloskopaufnahme der LMM-Rohdaten

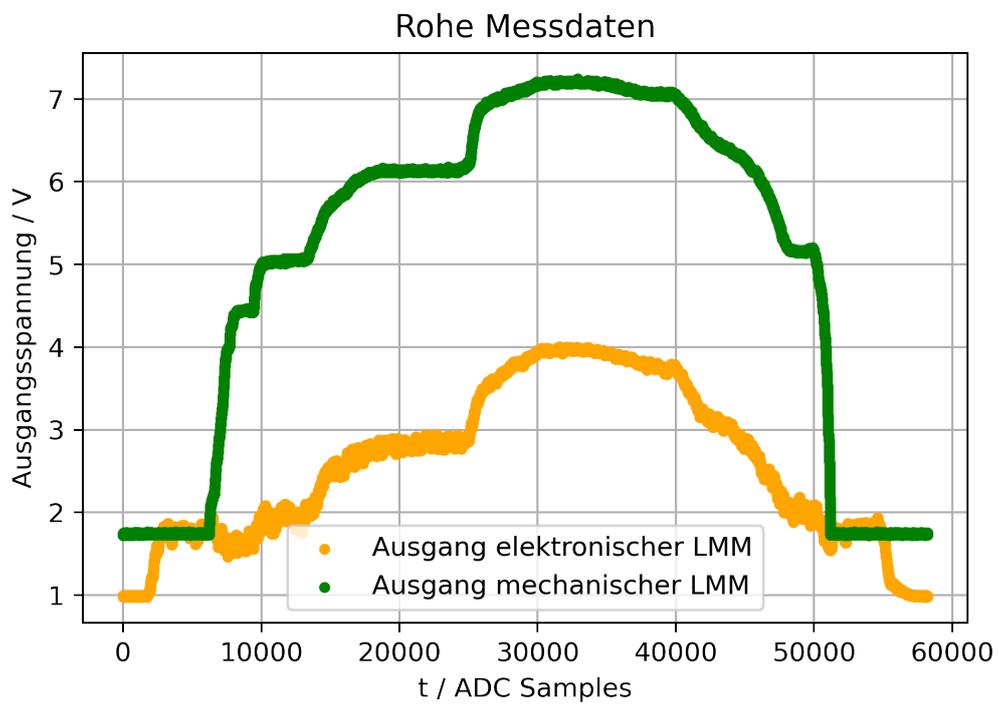


Abbildung 17: Rohe Messdaten (Luftmenge bzw. Luftmasse)

3.3.2 Kennlinienaufnahme der NTC-Thermistoren

Die Kennlinie des Thermistors, der im elektronischen LMM mit der Teilenummer „HFM 5“ verbaut ist, kann dem Datenblatt des Herstellers Bosch ([10], S. 2) entnommen werden (siehe Abb. 18). Zur Kennlinie des Thermistors, der im mechanischen LMM verbaut ist, liegen keine Herstellerangaben vor. Somit musste die Kennlinie messtechnisch ermittelt werden. Bei einem Teil der NTC-Messungen wurde der zuvor in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Aufbau verwendet (siehe Abb. 15). Die Erfassung der NTC-Widerstände erfolgte mit einem Multimeter. Die Widerstandswerte beider Thermistoren wurden gemessen und abgespeichert. Zusätzlich wurde die Temperatur der Luft mit einem Temperaturmessgerät bestimmt.

Es wurde eine Messung bei Raumtemperatur und starker Luftdurchströmung mittels Staubsaugern durchgeführt.

Für die Messungen über Raumtemperatur wurde die angesaugte Luft durch einen Föhn erhitzt.

Außerdem wurden beide LMM in einem Kühlschrank heruntergekühlt, um Messdaten bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen zu erhalten. Die Homogenität der Temperatur im Inneren der LMM wurde durch langes Warten gewährleistet. Bei der Messung im niedrigen Temperaturbereich wurde keine Luft durch die LMM gezogen, da sonst die wärmere Raumluft die Temperatur angehoben hätte.

Die dritte Messmethode bestand darin, dass die LMM über Nacht in einem geschützten und durchlüfteten Behälter draußen gelagert wurden. Am Morgen wurden die Messwerte aufgenommen. Dadurch dass beide LMM über einen langen Zeitraum der selben Temperatur ausgesetzt waren, konnte sich die Temperatur im Inneren angleichen.

Die Ergebnisse der Messungen sind auf den Abb. 19 und 20 dargestellt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 3.3.3.2.

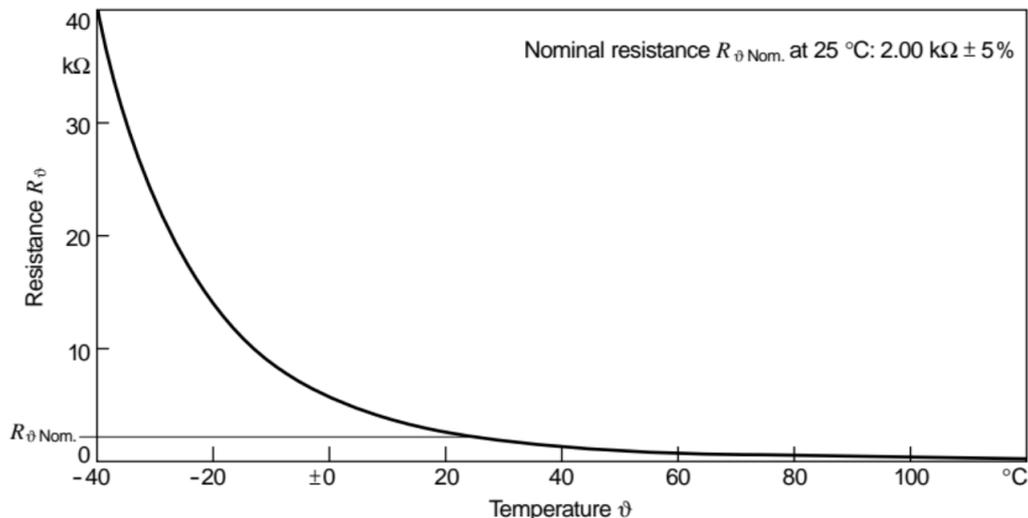


Abbildung 18: Kennlinie des NTC-Thermistors im HFM 5 ([10], S. 2)

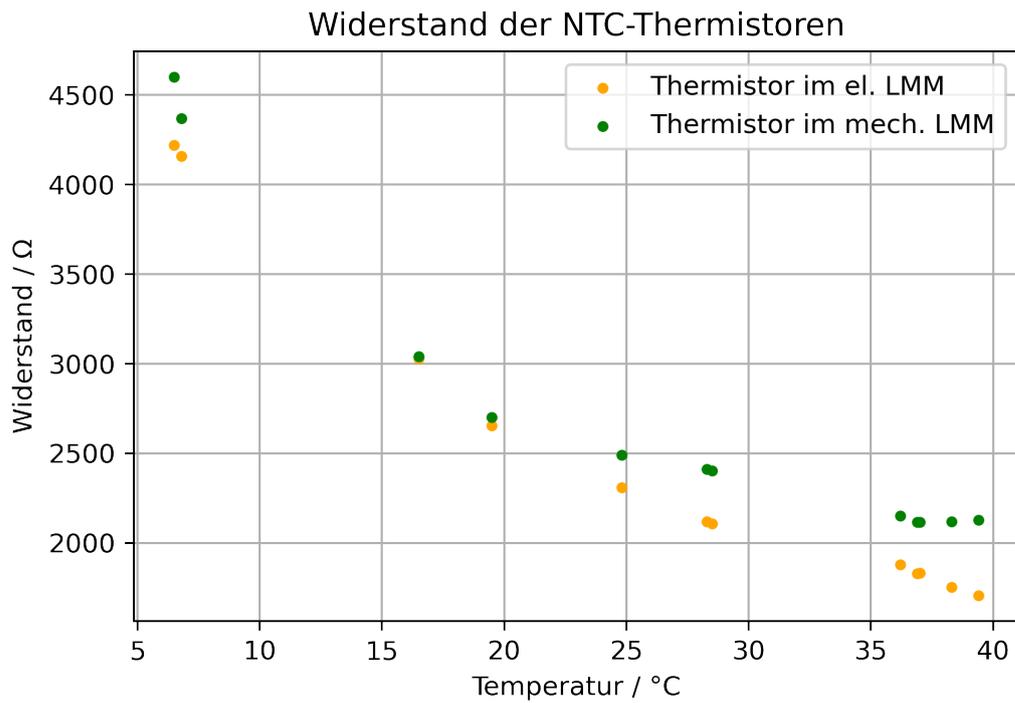


Abbildung 19: Widerstände der NTCs in Abhängigkeit von der Temperatur

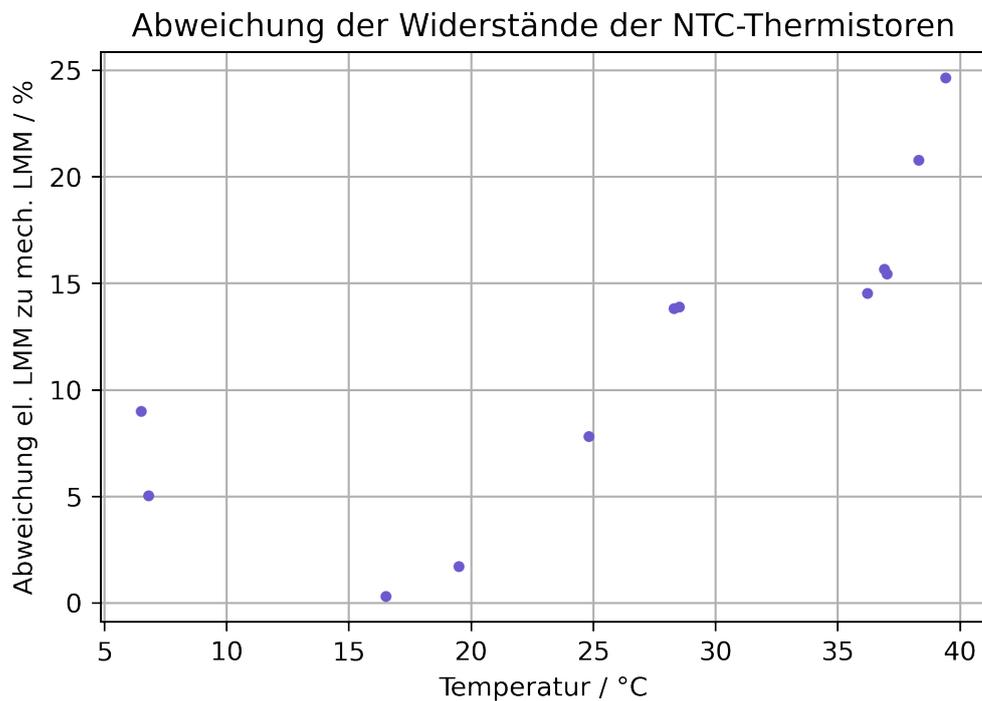


Abbildung 20: Abweichung der Widerstände der NTCs in Abhängigkeit von der Temperatur

3.3.3 Interpretation der Messergebnisse

3.3.3.1 Luftmessung

Die Nachbildung des Luftmengensignals anhand des Ausgangs des elektronischen Luftmassenmessers ist realisierbar, da eine Korrelation zwischen den Messwerten deutlich sichtbar ist. Der moderne Luftmassenmesser weist eine höhere Empfindlichkeit im Fall geringer Durchströmung auf (siehe Abb. 17). Grund hierfür ist der einstellbare Luft-Bypass im mechanischen LMM. Durch diesen kann eine geringe Menge Luft strömen, ohne dass die Klappe und das integrierte Potentiometer bewegt werden.

3.3.3.2 Thermistoren

Der Thermistor im mechanischen LMM weist ebenfalls die NTC-Charakteristik auf.

Die Kennlinien beider Thermistoren sind ähnlich aber nicht identisch. Teilweise weisen die Messdaten große Abweichungen auf. Es wird deutlich, dass sich die Widerstände bei Zimmertemperatur kaum unterscheiden, bei höheren Temperaturen ist der Unterschied deutlich größer (bis zu 25 %; siehe Abb. 20).

Da die Messverfahren nicht optimal waren, besitzen die Daten eine eingeschränkte Aussagekraft.

Für die Aufnahme der Daten bei Temperaturen über Raumtemperatur kam ein Heißluftföhn zum Einsatz. Aufgrund der geringen Heizleistung bzw. des hohen Luftstroms ist nicht gewährleistet, dass die Luft homogen erhitzt wurde. Dies kann Auswirkungen auf die Messgenauigkeit haben.

Die Messpunkte mit den geringsten Abweichungen sind bei 16,5 °C zu beobachten (siehe Abb. 20). Diese Datenpunkte wurden bei der Messung im Freien nach der Lagerung über Nacht aufgenommen. Diese Art der Messung bietet die höchste Sicherheit, dass beide NTC-Thermistoren während der Messung auf gleicher Temperatur waren.

Es lässt sich nicht mit abschließender Sicherheit feststellen, was die Ursache für die teilweise große Abweichung ist. Es ist möglich, dass es sich um NTC-Thermistoren handelt, die verschiedene Kennlinien besitzen.

Starke Unterschiede treten in Temperaturbereichen auf, die für den alltäglichen Betrieb eines Fahrzeugs in Mitteleuropa nicht kritisch sind. Somit ist es möglich, den Thermistor aus dem elektronischen LMM direkt an das Steuergerät des Oldtimers anzuschließen, da das Verhalten bei in Europa üblichen Temperaturen ähnlich genug ist.

Dennoch kann dies potentiell nicht genau genug sein. Aus diesem Grund folgt aus den Messungen, dass es zusätzlich zu der Nachbildung des Luftmengensignals auch eine Möglichkeit zur Nachbildung des NTC-Thermistors, anhand einer ermittelten Kennlinie, geben muss.

3.4 Datenkorrelation und Kennlinienbestimmung mittels Regression

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie aus Messdaten der LMM eine Kennlinien-gleichung berechnet wird. Auf Basis der bestimmten Koeffizienten ist die Firmware des Mikrocontrollers (siehe Abschnitt 3.10) in der Lage, das Verhalten des mech. LMM originalgetreu nachzubilden.

Es wird nur die Koeffizientenbestimmung bezüglich der LMM-Messdaten behandelt, da auf der entwickelten LMM-Retrofit-Platine ein Fehler vorliegt, der es nicht ermöglicht, die Temperatur des el. LMMs zu erfassen. Daher werden die Koeffizienten der NTC-Thermistoren nicht bestimmt. Auf dieses Problem wird im Abschnitt 4.2.2 detailliert eingegangen.

Der Quellcode zur Auswertung der Daten ist in Python geschrieben, da diese Programmiersprache aufgrund der vielen verfügbaren Packages und der simplen Syntax gut für diese Art von Aufgabe geeignet ist.

Es werden die Packages „numpy“, „matplotlib“ und „sklearn“ verwendet. „numpy“ bietet Methoden für den Umgang mit Zahlen und Datenstrukturen. Mit dem Package „matplotlib“ lassen sich Grafiken erzeugen. „sklearn“ wird für die Bestimmung der Kennliniengleichung verwendet. Als Entwicklungsumgebung wird Visual Studio Code mit dem Plugin „Jupyter-Notebook“ verwendet. Jupyter-Notebooks erlauben es, Programmcode in Segmente aufzuteilen und vereinfachen den Workflow. Auf der Abb. 21 ist die Entwicklungsumgebung dargestellt.

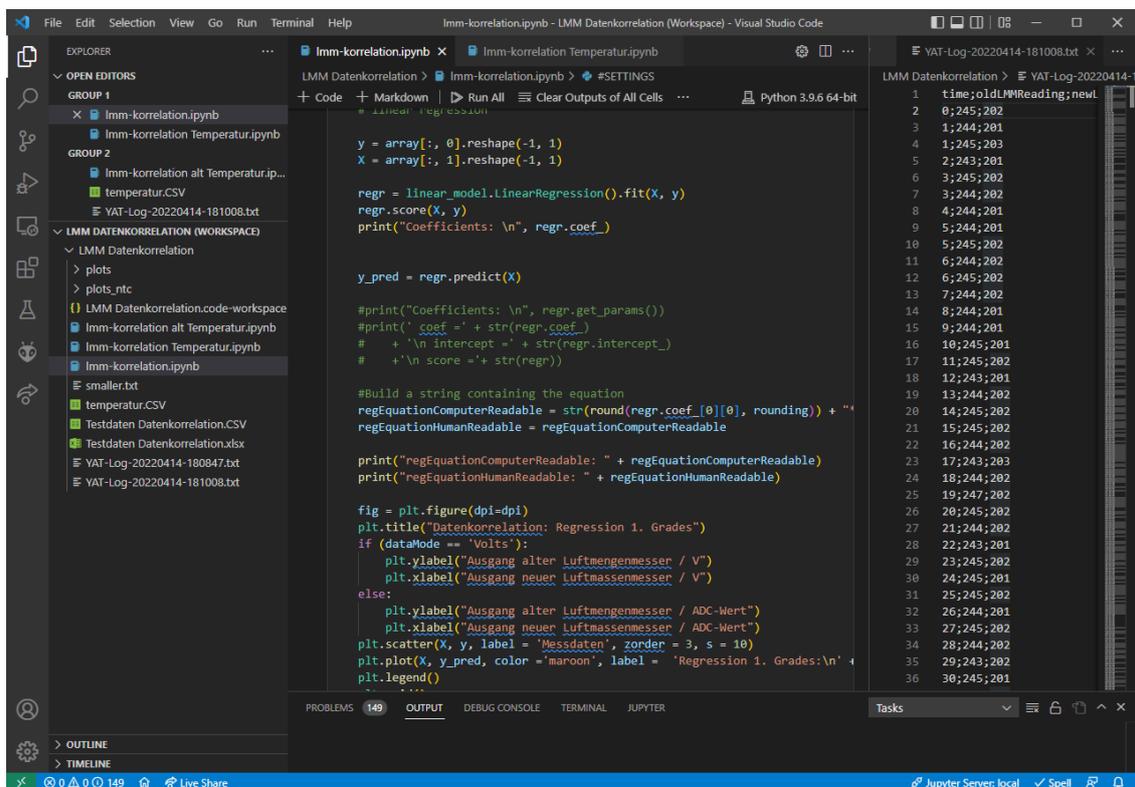


Abbildung 21: Screenshot der Entwicklungsumgebung Visual Studio Code

Die Verarbeitungsschritte der Messdaten sind:

1. Skalierung der Messdaten des el. LMMs, da bei der Messdatenaufnahme ein Spannungsteiler zum Einsatz kam
2. Bereinigung der Messdaten, da teilweise kein sinnvoller Zusammenhang zwischen den Daten existiert
3. Regression 1. und 2. Grades zwecks einer Visualisierung sowie Evaluierung der Genauigkeit der ermittelten Kennlinie in Bezug auf den praktischen Einsatz
4. Berechnung der Parameter auf Basis der Regression 2. Grades. Diese Parameter werden in der Firmware des Mikrocontrollers zur Berechnung des Ausgangswerts verwendet

Die aufgelisteten Schritte werden im Folgenden im Detail erläutert.

Die Skalierung der Messdaten des el. LMMs ist nötig, da bei der Aufnahme der Ausgangsspannung des mechanischen LMMs ein Spannungsteiler zum Einsatz kam. Aufgrund des Teilers muss der Messwert mit dem Inversen des Teilverhältnisses multipliziert werden, um den realen Ausgangsspannungswert bei der Regression verwenden zu können.

Anschließend werden die Messdaten bereinigt. Die Abb. 22 zeigt die Messdaten vor der Entfernung der nicht verwendbaren Datenpunkte. Auf der Abb. 23 ist der verwendbare Teil der Daten dargestellt. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Ausgangssignalen beider LMM erkennbar.

Die auf den Abbildungen 22 bis 26 dargestellten Koordinatensysteme sind nach dem selben Schema aufgebaut:

- Abszisse: Ausgangssignal des elektronischen LMMs
- Ordinate: Ausgangssignal des mechanischen LMMs

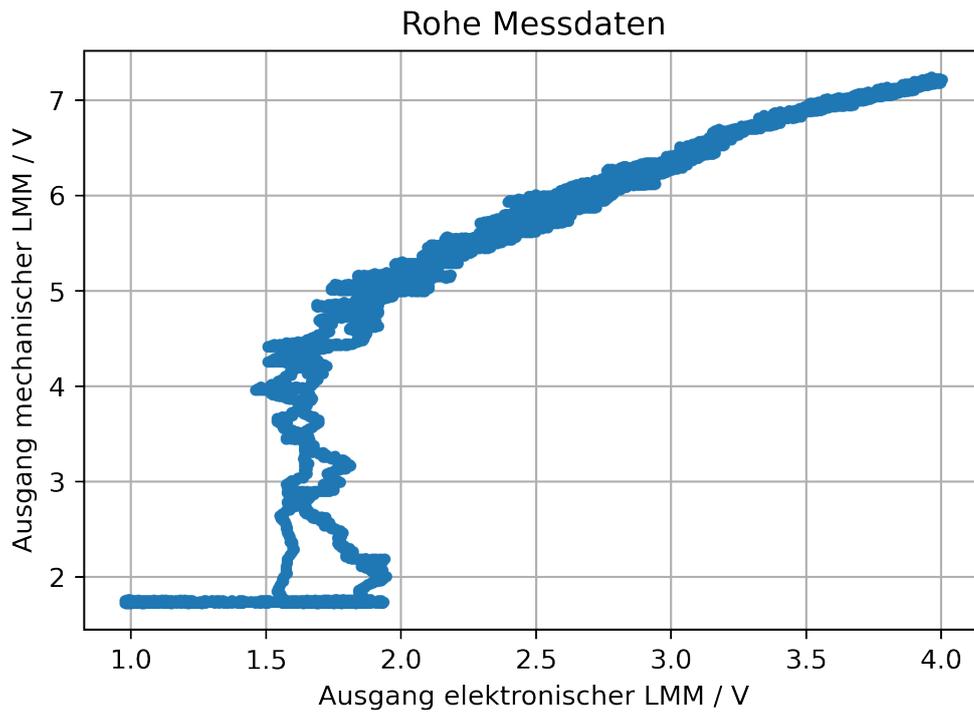


Abbildung 22: Messdaten vor der Bereinigung

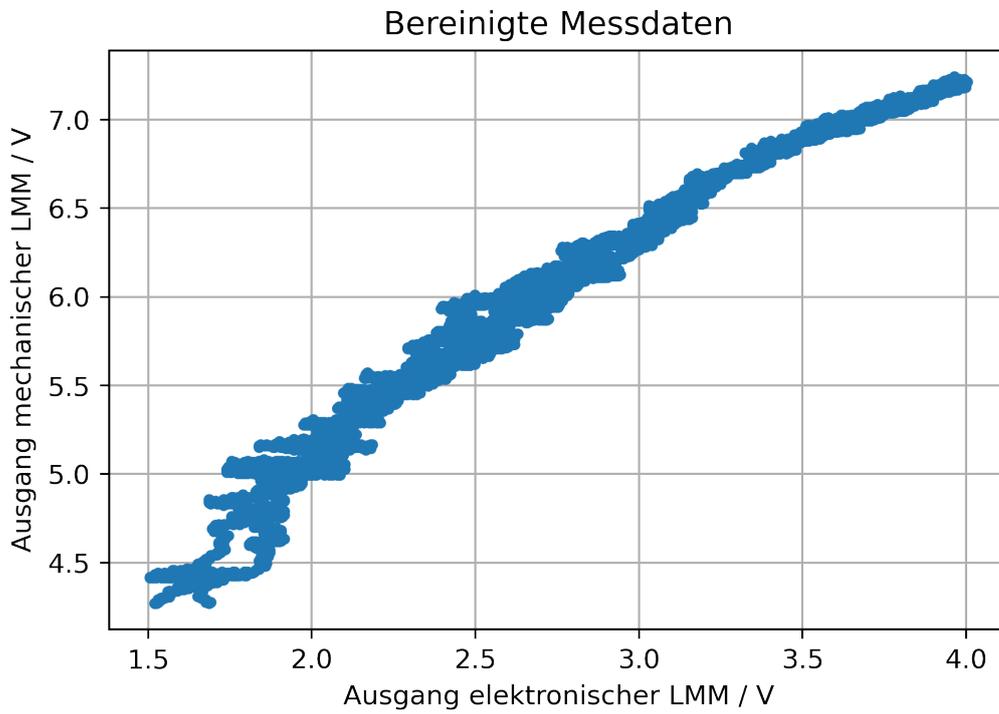


Abbildung 23: Messdaten nach der Bereinigung

Zunächst wird eine lineare Regression zur Berechnung der Kennlinie diskutiert. Das Ergebnis ist auf Abb. 24 dargestellt. Die rote Gerade wird vom Programm mathematisch optimal durch die Datenpunkte gelegt. Allerdings ist zu erkennen, dass im niedrigen und hohen Eingangsspannungsbereich die Abweichung der berechneten Geraden von den Messdaten zunimmt. Somit wird deutlich, dass die Berechnung des Ausgangssignal nicht auf Grundlage dieser Funktionsgleichung (siehe Gl. 1) erfolgen kann. Insbesondere deswegen nicht, da der Verbrennungsmotor in der Praxis mehr Luft ansaugt, als die beiden Staubsauger leisten konnten, mit denen die Daten aufgenommen wurden. Somit würde bei Verwendung der linearen Funktion der Fehler im höheren Drehzahlbereich zunehmend größer werden.

$$f_1(x) = 1.104 * x + 2.9401 \quad (1)$$

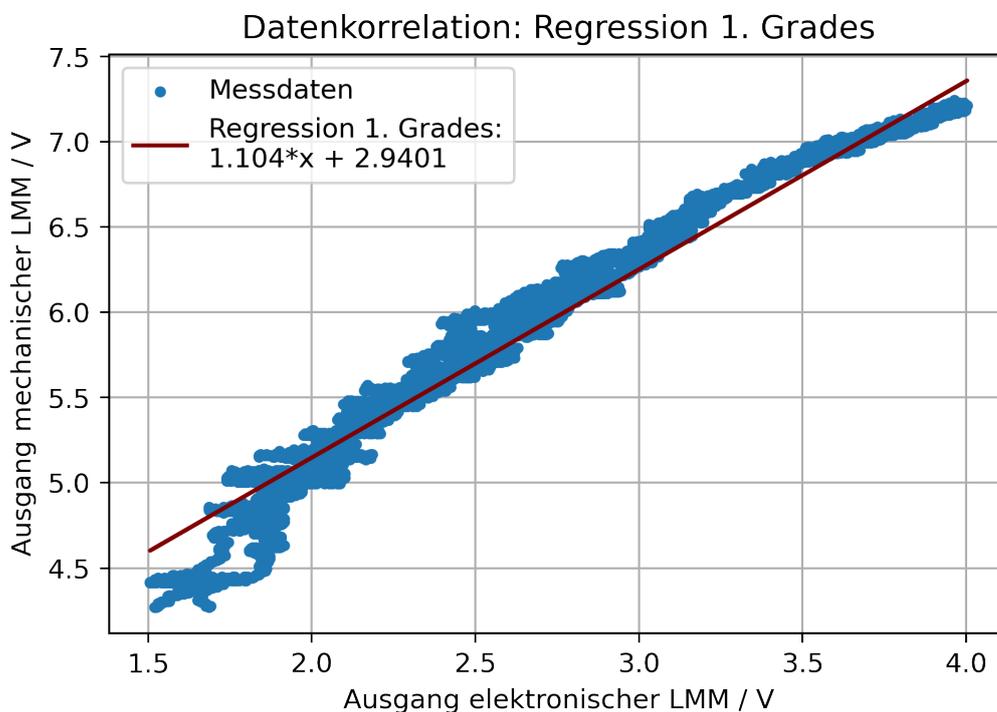


Abbildung 24: Messdaten mit linearer Regression

Aus dem oben genannten Grund wird eine Regression 2. Grades für die Kennlinienberechnung verwendet. Diese liefert eine Funktion (siehe Gl. 2), die den Zusammenhang zwischen den Messdaten im relevanten Bereich besser nachbildet, als die lineare Regression (siehe Abb. 25). Auf Basis der ermittelten Funktionsgleichung 2 kann aus einem Messwert, der vom elektronischen LMM stammt, die Ausgangsspannung berechnet werden, die der mechanische LMM unter gleichen Bedingungen ausgeben würde.

$$f_2(x) = -0.2091 * x^2 + 2.3206 * x + 1.2855 \quad (2)$$

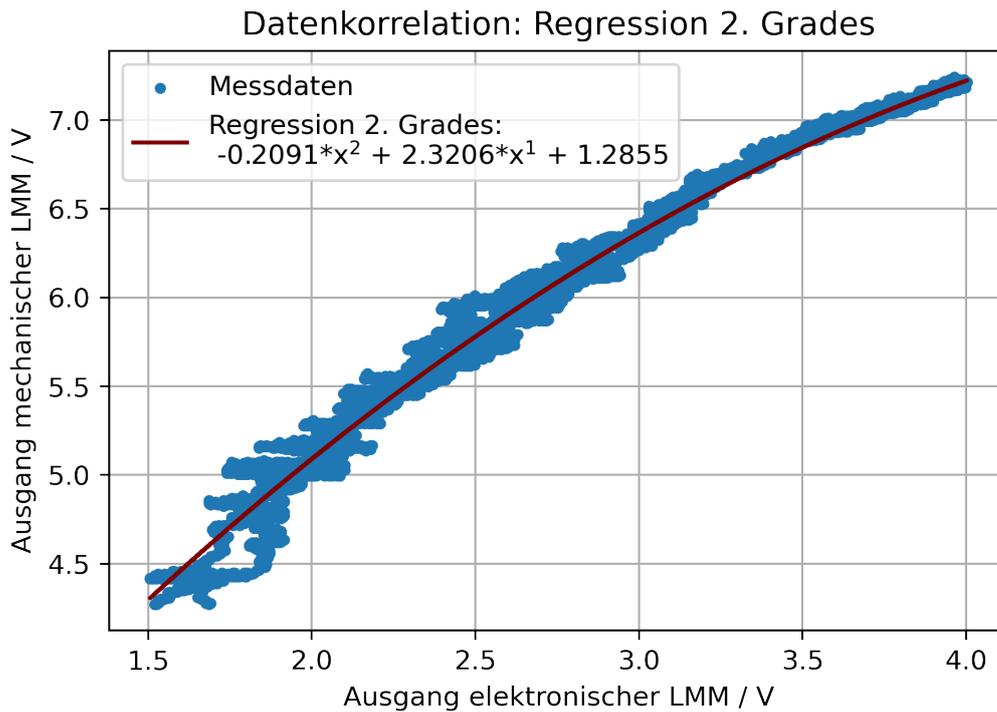


Abbildung 25: Messdaten mit Regression 2. Grades

Im Praxiseinsatz berechnet der Mikrocontroller kontinuierlich das passende Ausgangssignal und gibt dieses über die DAC und OPV-Stufe aus. Um Rechenzeit im Mikrocontroller einzusparen, wurde die Regression 2. Grades mit angepassten Einheiten erneut durchgeführt (siehe Abb. 26). Da der Mikrocontroller das Signal des elektronischen LMMs mit seinem ADC abtastet, ist es sinnvoll, diesen Wert direkt als Parameter für die Regressionsgleichung zu verwenden. So kann die Umrechnung des ADC-Werts in eine Spannung vermieden werden und der ADC-Wert direkt in die Funktionsgleichung eingesetzt werden. Auf der Abszisse der Grafik sind die ADC-Werte aufgetragen, die Ordinate gibt die hierzu passende Ausgangsspannung an. Die angepasste Regression liefert ebenfalls drei Koeffizienten (siehe Abb. 3)⁴.

$$f_{2ADC}(x) = -5.03867 * 10^{-06} * x^2 + 0.01139 * x + 1.27081 \quad (3)$$

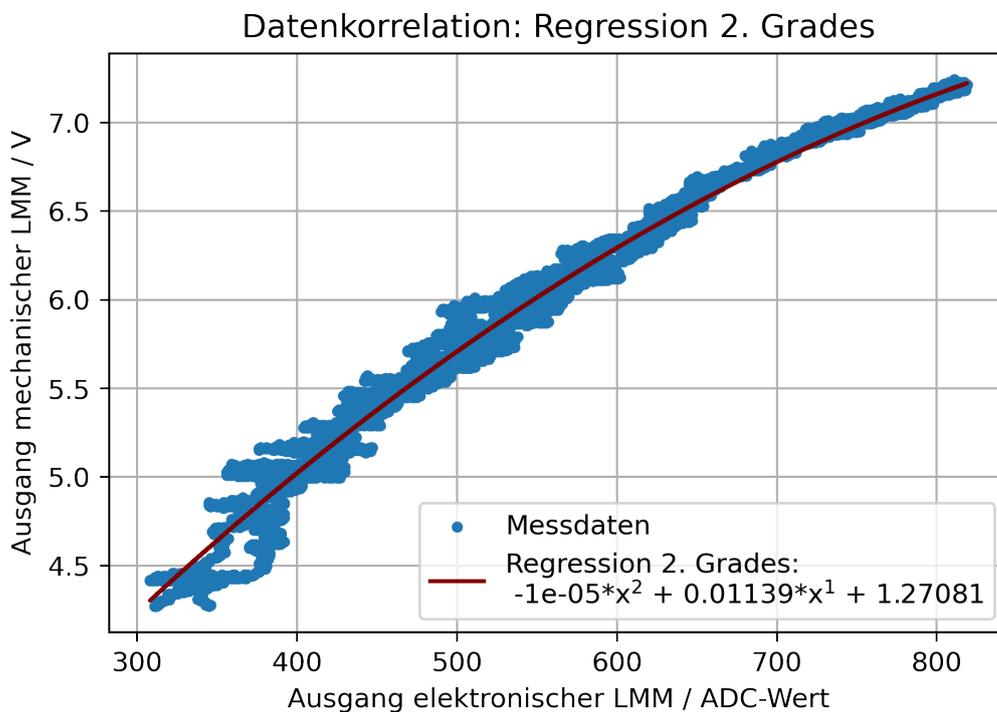


Abbildung 26: Messdaten mit Regression 2. Grades, angepasst an ADC-Messung

Das Python-Programm ist dahingehend automatisiert, dass alle erzeugten Graphen automatisch gespeichert werden. Außerdem werden die vom Programm berechneten Koeffizienten formatiert ausgegeben, so dass diese leicht in den Quellcode des Mikrocontrollers übernommen werden können (siehe Auflistung 1).

```

1 #define DAC_COEFF_X2          -5.03867026459992e-06
2 #define DAC_COEFF_X1          0.011394322818422465
3 #define DAC_COEFF_OFFSET      1.2708127192597996

```

Quellcode 1: Durch Regression bestimmte Koeffizienten der Kennlinie

⁴Durch die Rundung des ersten Koeffizienten weicht dieser auf Abb. 26 vom Wert aus der Gleichung 3 ab. Die Gleichung 3 gibt den exakten Wert an.

3.5 Schaltungsentwicklung

Auf Basis der im Abschnitt 1.2 aufgestellten Anforderungen wurde ein Schaltplan entwickelt. Der vollständige Schaltplan ist dem Anhang unter Abschnitt 6.2 zu entnehmen.

Die Entwicklung des Schaltplans lässt sich in zwei Stufen unterteilen, die Bauteilselektion (siehe Abschnitt 3.6) und die Schaltplanentwicklung (siehe Abschnitt 3.7). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Open-Source Software KiCAD (Version 6.0.5) zum Erstellen der Schaltpläne und dem Platinenlayout verwendet.

3.6 Bauteilselektion

Dieser Abschnitt beschreibt die grundlegenden Design-Paradigmen, die bei der Bauteilselektion befolgt wurden. Im Abschnitt 3.7 wird die Selektion zentraler Bauteile detailliert beschrieben.

Die fertige Platine soll in einem Automobil, ggf. sogar im Motorraum zum Einsatz kommen. Diese Umgebung ist harsch, es können Vibrationen und hohe Temperaturen auftreten. Außerdem sind die Anforderungen an Automobilelektronik besonders streng, da diese zumindest zum Teil sicherheitsrelevant ist. Hinzu kommt die Erwartung, dass die Zuverlässigkeit sehr hoch ist.

Aus diesen Gründen wurde bei der Selektion der elektronischen Bauteile darauf geachtet, diese Anforderungen zu erfüllen. So werden zum Beispiel fast ausschließlich Integrated Circuit (IC)s oder passive Bauelemente mit der Automotive Electronics Council (AEC)-Qualifikation verwendet. Die AEC-Spezifikationen werden bei Tests und Verifikation von elektronischen Bauteilen verwendet und sind speziell im Bereich Automobil relevant (vgl. [3]). Nicht in allen Fällen ist es möglich, ein AEC-qualifiziertes Bauteil zu wählen, da bestimmte Komponenten diese Qualifikation nicht besitzen und es keine Alternative gibt. Beispiele sind der Mikrocontroller und die USB-zu-UART-Bridge.

Bei der Auswahl der passiven Komponenten und simpler Halbleiter (Dioden und Transistoren) wurde darauf geachtet, diese in Bezug auf die zu erwartenden Belastungen überzudimensionieren. Somit werden diese Komponenten z.B. nicht an der Grenze der thermischen Belastung arbeiten und weniger schnell ausfallen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Footprint bzw. Package, d. h. die physische Größe, die das Bauteil besitzt. In Bezug auf passive Bauteilen gibt es diese in der Regel in schrittweise kleiner bzw. größer werdenden Gehäusen, die jeweils Vor- und Nachteile bieten. Da die Komponenten von Hand verlötet werden oder zumindest von Hand auf der Platine platziert werden, wurde das 0805-Package bei Surface Mounted Device (SMD)-Widerständen und Kondensatoren selektiert. Dieses ist problemlos von Hand zu löten, allerdings auch nicht so groß, dass der Platzverbrauch zu stark steigt.

Bei integrierten Schaltkreisen wurde das kleinste verfügbare SMD-Package selektiert, welches von Hand verlötet werden kann. Bei ICs gibt es in der Regel keine vergleichbar große Auswahl an verschiedenen großen Packages, daher wird aufgrund fehlender Alternativen teilweise ein sehr kleines Package verwendet.

Um den Bestückungs- und Bestellprozess zu vereinfachen, wurde die Zahl verschiedener Bauteilvariationen so weit wie möglich gesenkt. Dies kann Fehler sowohl beim Bestellen der Bauteile, aber insbesondere beim Bestücken der Platine verringern, da die Verwechslungsgefahr mit einem anderen Bauteil sinkt. Besondere Relevanz haben hierbei die SMD-Widerstände und Kondensatoren. Für Aufgaben, wie zum Beispiel die Strombegrenzung einer Light Emitting Diode (LED) und den Pull-Up eines General Purpose Input / Output (GPIO)s kann der selbe Widerstandswert verwendet werden.

Dies ist nicht in allen Fällen ohne Probleme anwendbar, insbesondere bei analogen Schaltungen ist eine Änderung in der Regel nicht möglich, ohne dass sich die Eigenschaften der Schaltung maßgeblich ändern. So benötigt die USB-zu-UART-Bridge beispielsweise einen Spannungsteiler mit speziellen Widerstandswerten. In dem Fall ist es nicht möglich, die Werte durch schon verwendete zu substituieren.

Zu den wichtigsten Parametern eines Bauteils zählen der Preis, die Größe des Gehäuses und die Verfügbarkeit sowie weitere bauteilspezifische Eigenschaften.

Wenn zum Beispiel ein SMD-Keramikkondensator für die Spannungsstabilisierung oder Siebung nach einem Linearregler zum Einsatz kommt, so ist die Kapazität relevant. Außerdem ist wichtig, dass der interne Widerstand möglichst niedrig ist. Bedingt durch das kleine Gehäuse besitzen SMD-Kondensatoren einen geringen Innenwiderstand und eine geringe parasitäre Induktivität. Daher sind sie in vielen Fällen gegenüber Aluminium-Elektrolytkondensatoren zu bevorzugen. Auf der LMM-Retrofit-Platine kommen aus diesen Gründen ausschließlich Keramikkondensatoren zum Einsatz.

Zur Auswahl der Bauteile wurde die Seite des Elektronikbauteil-Distributors Digikey verwendet. Die Website verfügt über eine parametrierbare Such- und Filterfunktion, die sehr hilfreich bei der Eingrenzung der Zahl von relevanten Ergebnissen ist.

Die Schaltplanentwicklung (siehe Abschnitt 3.7) und Bauteilselektion wurde in großen Teilen parallel vorgenommen. Dies war im Fall von Widerständen und anderen sehr häufig verwendeten Komponenten nicht kritisch, aber besonders wichtig bei Halbleitern, um zu garantieren, dass diese lieferbar waren. So konnte vermieden werden, dass Bauteile auf dem Schaltplan verwendet werden, die nicht lieferbar sind.

Außerdem konnte bereits jedem Symbol im Schaltplan ein Footprint für die Platine zugewiesen werden, was das Layout (siehe Abschnitt 3.8) vereinfachte. Zum Teil mussten die Footprints nach Herstellernangaben, die im passenden Datenblatt zu finden sind, gezeichnet werden, sofern diese nicht bereits in der KiCAD-Bibliothek existierten.

3.7 Schaltplandesign

Der Schaltplan ist in funktionale Gruppen strukturiert, um ihn besser lesbar zu machen. Außerdem sind besondere, zusammengehörige Gruppen auf eigenen sog. hierarchischen Seiten platziert. Dies verbessert ebenfalls die Lesbarkeit, da somit eine Abstraktionsebene entsteht und der Schaltplan bereits ein grobes Blockschaltbild darstellt.

Die funktionalen Gruppen sind mit Überschriften versehen. Diese und weitere Dokumentationen im Schaltplan sind bewusst in englischer Sprache verfasst, um die Arbeit nicht-deutschsprachigen Menschen zugänglicher zu machen.

Die Abb. 27 zeigt die Unterteilung des Schaltplans in die folgenden Blöcke:

- Mikrocontroller
- lokale Spannungsversorgung
- Universal Serial Bus (USB)-zu-UART-Bridge
- Stecker zum Fahrzeug & elektronischen LMM sowie DAC-Schaltung etc.
- mechanische Elemente (Befestigungslöcher etc.)

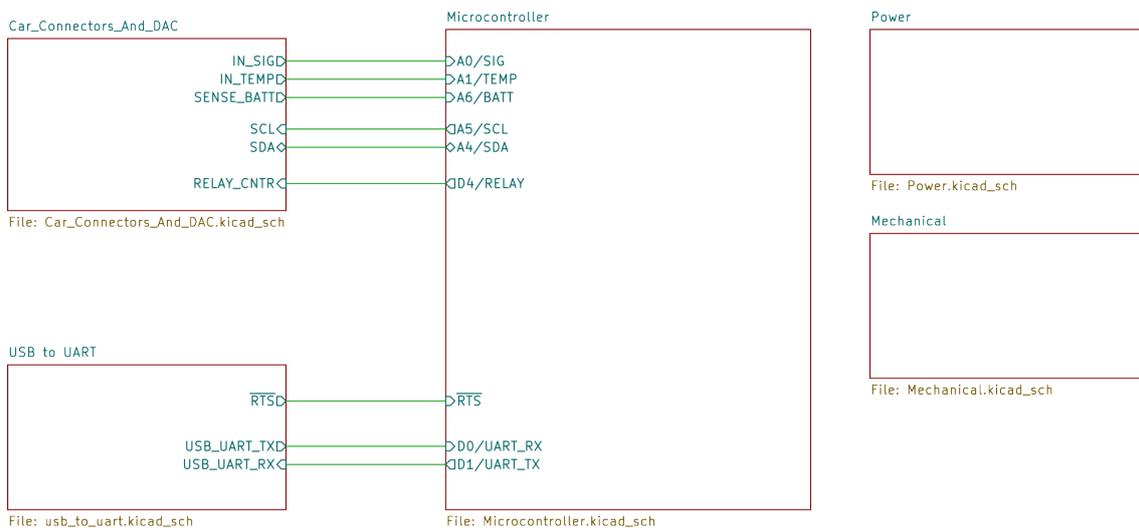


Abbildung 27: Übersicht Schaltplan

Wichtig zu beachten ist, dass globale Netzlabel, wie z.B. Masse- und Spannungslabel nicht auf dieser Übersicht zu sehen sind. Diese Netze sind blockübergreifend durch die Verwendung globaler Label miteinander verbunden.

3.7.1 Mikrocontroller

Beim Mikrocontroller handelt es sich um einen ATmega328P-20A, der einen 8-Bit AVR-Kern mit 2 kB Static Random Access Memory (SRAM) und 32 kB Flashspeicher beinhaltet (vgl. [2], S. 1). Dieser wurde gewählt, da bereits zuvor mit diesem gearbeitet wurde und dementsprechendes Wissen vorlag. Außerdem kann dieser mit dem Arduino-Bootloader bespielt werden und dann mit der Arduino Integrated Development Environment (IDE) programmiert werden. Dies vereinfacht die Programmierung.

Der Systemtakt von 16 MHz wird durch einen piezokeramischen Resonator (Y1) erzeugt (siehe Abb. 28). Dieser ist geringfügig günstiger als ein Quarzoszillator und benötigt dank der eingebauten Lastkapazitäten keine externen Komponenten (vgl. [13], S. 2). Die absolute Genauigkeit spielt in diesem Anwendungsfall keine Rolle, somit reicht die Frequenztoleranz von $\pm 0.5\%$ (vgl. [13], S. 2).

Die fünf Keramikcondensatoren (C2, C3, C4, C8 und C9) dienen der Siebung von Spannungen. Der Kondensator C2 am Pin „AREF“ stabilisiert die interne Referenzspannung, die über den Pin ausgegeben werden kann. Die restlichen vier Abblockcondensatoren sind vor allem wichtig, um kurzzeitige Schaltströme bereitzustellen, wenn die digitalen Gatter im IC schalten oder über die externen GPIOs Lasten geschaltet werden. In diesem Fall können die sehr nah am IC platzierten Kondensatoren kurzzeitig hohe Ströme bereitstellen.

Die Pull-Up Widerstände R10 und R11 sind nötig für den I²C-Bus, da die Busteilnehmer nur nach dem Open-Drain-Prinzip arbeiten.

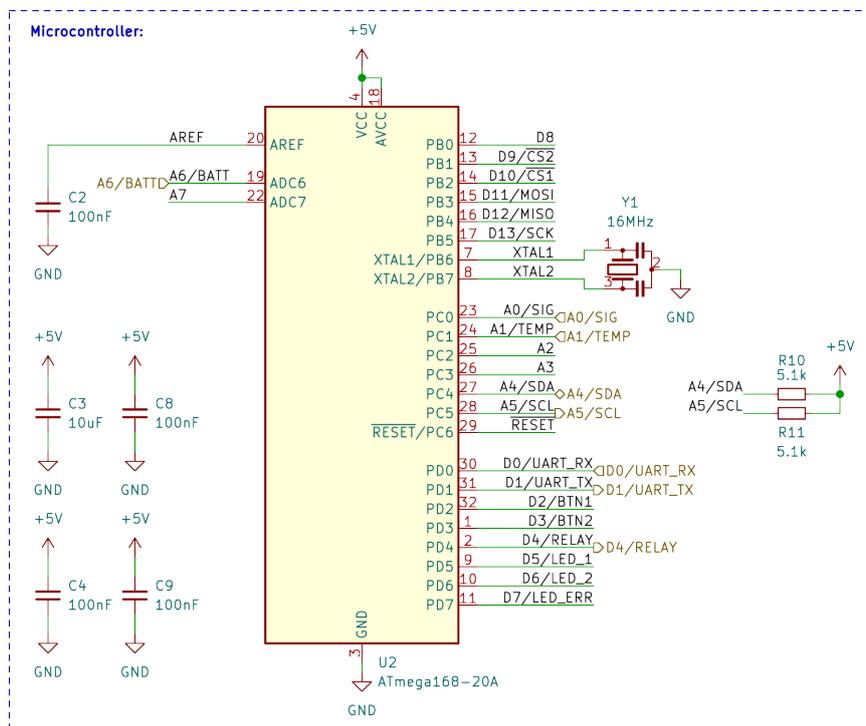


Abbildung 28: Anschlüsse am Mikrocontroller

3.7.1.1 Reset-Taster und externer Reset

Der Reset-Taster (siehe Abb. 29) kann verwendet werden, um den Mikrocontroller, zum Beispiel während der Softwareentwicklung, zurückzusetzen. Es handelt sich hierbei um ein „active-low“ Signal, das heißt, dass der Reset erfolgt, wenn das Signal auf Massepotential ist. Der Widerstand R2 zieht den \overline{RESET} -Pin auf 5 V.

Über den Kondensator C1 kann der Mikrocontroller über eine externe Quelle zurückgesetzt werden. Der Kondensator dient hierbei dazu, nur im kurzen Moment des externen Resets einen Strom fließen zu lassen. Wenn durch die externe Reset-Quelle, die sich die Masse mit dem Mikrocontroller teilt, der linke Anschluss des Kondensators (\overline{DTR} bzw. \overline{RTS}) auf Masse gezogen wird, so liegen am \overline{RESET} -Pin des Mikrocontrollers 0 V an. In diesem Moment stellt der Kondensator kurzzeitig einen Kurzschluss nach Masse dar. Erst nachdem dieser über den Widerstand R2 wieder auf ca. 5 V geladen wurde, startet der Mikrocontroller wieder.

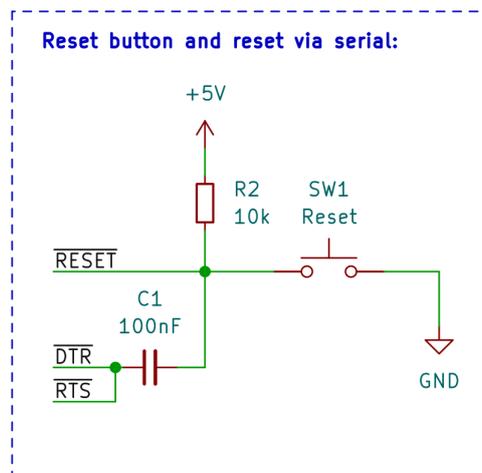


Abbildung 29: Reset Taster und externer Reset über \overline{DTR} oder \overline{RTS}

3.7.1.2 Programmierung und Debugging

Über den In Circuit Serial Programming (ICSP)-Header (siehe Abb. 30) kann der Bootloader auf den Mikrocontroller geladen werden. Außerdem ist ein UART-Header vorgesehen, über den das Programm debuggt werden kann oder eine neue Revision über den Bootloader geladen werden kann.

Die Diode D2 verhindert, dass ggf. Spannung in das externe UART-Modul zurückgespeist wird, welches häufig an einem USB-Port eines PCs angeschlossen ist. Dies könnte passieren, wenn die Platine von einer separaten Spannungsquelle versorgt wird und die lokale 5 V-Versorgung etwas über der des USB-Ports liegt.

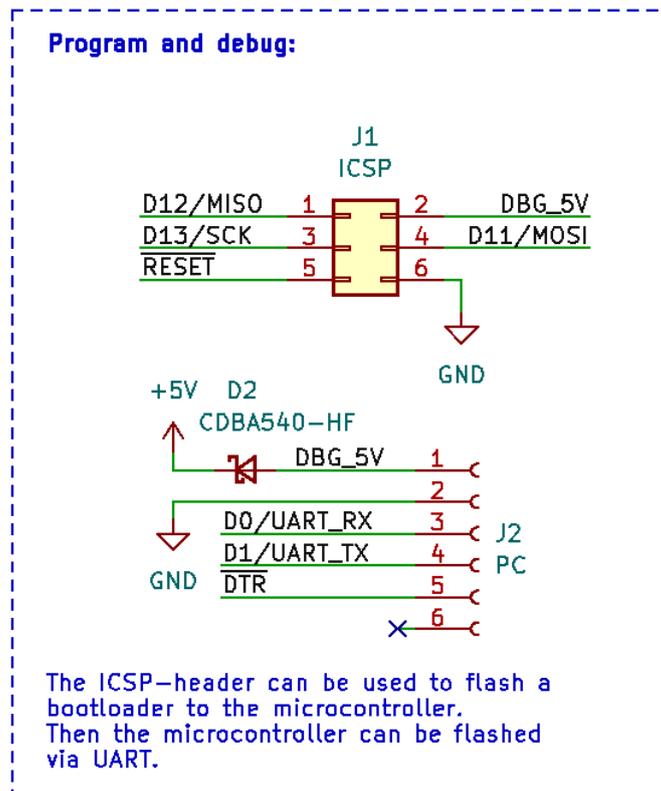


Abbildung 30: UART- und ICSP-Header

3.7.1.3 Ein- und Ausgabemöglichkeiten für den Nutzer

Über die Taster BTN1 und BTN2 (siehe Abb. 31) können Benutzereingaben erfasst werden. Die Schaltung ist per Hardware entprellt. Die Taster besitzen die IP67-Schutzart. Dies ist relevant, da im Motorraum eines Fahrzeugs Schmutz und Staub vorhanden ist. Diese Einflüsse dürfen die Funktion der Taster nicht beeinträchtigen.

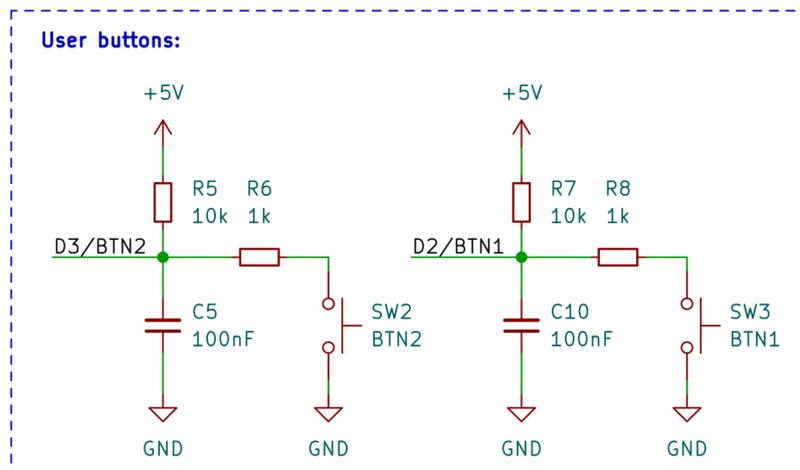


Abbildung 31: Taster für Benutzereingaben

Über die programmgesteuerten LEDs (siehe Abb. 32) können verschiedene Informationen ausgegeben werden.

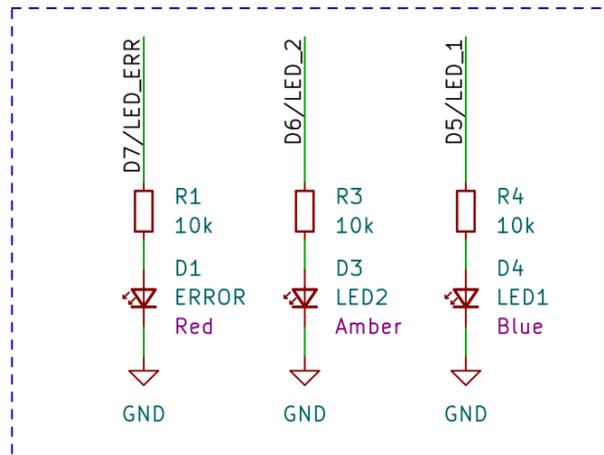


Abbildung 32: Softwaregesteuerte LEDs

3.7.1.4 Testpunkte

Die Testpunkte (siehe Abb. 33) erleichtern das Messen von den verschiedenen Signalen während des Debuggens.

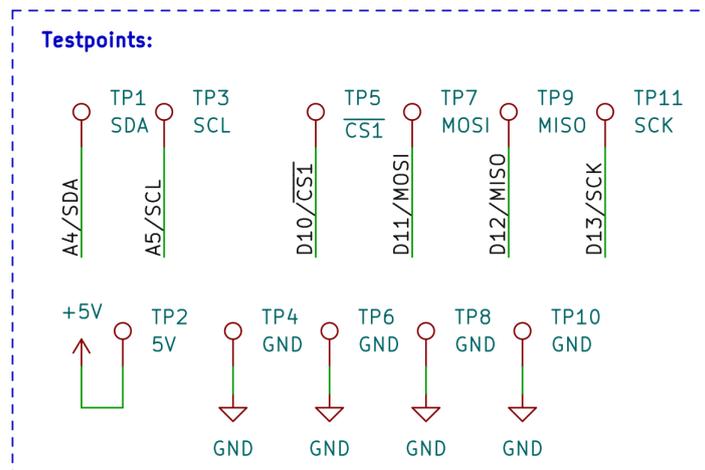


Abbildung 33: Testpunkte Mikrocontroller

3.7.2 Lokale Spannungsversorgung

Der Mikrocontroller und die restliche digitale Elektronik auf der Platine benötigen eine stabile Spannungsversorgung. Die Spannung wird vom Automobil bereitgestellt. Diese Spannung ist allerdings mit Störungen überlagert und kann mitunter stark schwanken. Außerdem ist sie mit ca. 12 V deutlich zu hoch. Daher kommt ein Linearregler (siehe Abb. 34) zum Einsatz, der die Spannung auf 5 V herunterregelt. Damit der Linearregler stabil arbeitet, sind zwei Keramikkondensatoren vorgesehen. Die Versorgungsspannung wird durch einen Ferritchip und die dahinterliegende Kapazität von insgesamt ca. 40 μF gefiltert. Die Simulation (siehe Abb. 35) zeigt, dass Frequenzen oberhalb von ca. 10 kHz geblockt werden.

Es wurde ein Linearregler eingesetzt, da der gesamte Laststrom der Schaltung nicht über 100 mA beträgt. Somit ist die Verlustleistung, die im Linearregler entsteht vernachlässigbar (siehe Gl. 4). Daher war es nicht nötig, einen teureren Tiefsetzsteller einzusetzen.

Berechnung der Verlustleistung des Linearreglers:

$$P_V = U_{Diff} * I_{Last} = (14 \text{ V} - 5 \text{ V}) * 0,1 \text{ A} = 0,9 \text{ W} \quad (4)$$

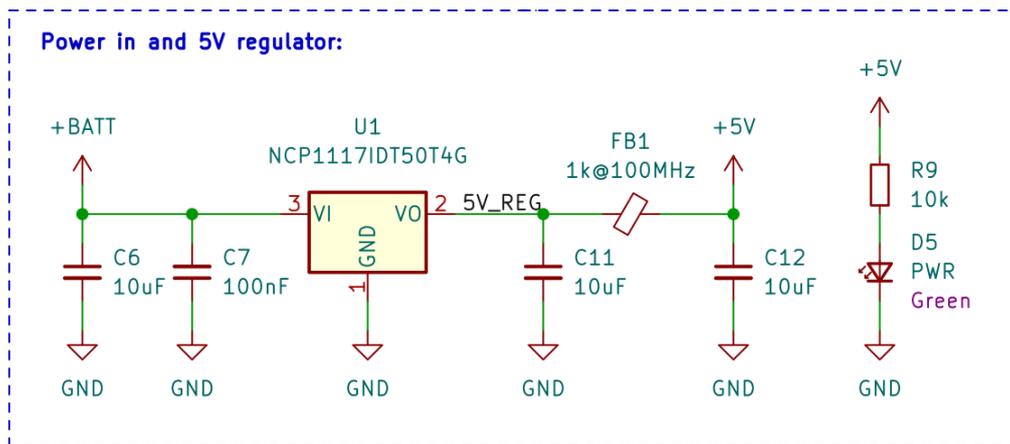


Abbildung 34: 5 V Linearregler

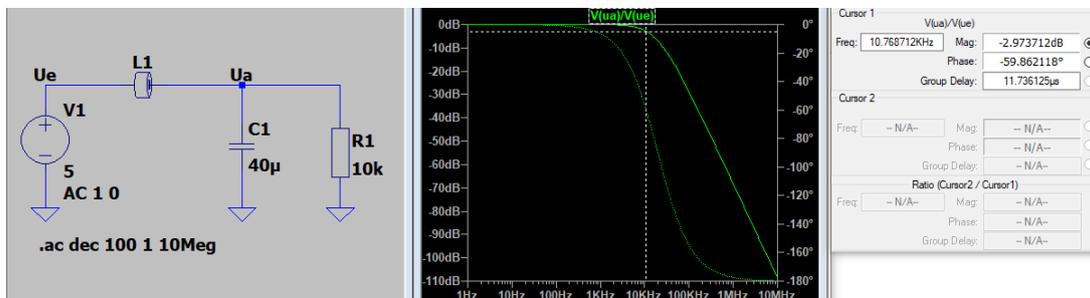


Abbildung 35: Simulation des Filters der Versorgungsspannung

3.7.3 USB-zu-UART-Bridge

Die USB-zu-UART-Bridge (siehe Abb. 36) ermöglicht es, das LMM-Retrofit-Board für den Anwender komfortabel per USB an einen Computer anzuschließen und über das UART-Interface Daten mit diesem auszutauschen oder ein neues Programm in den Mikrocontroller zu laden.

Es wird eine USB-C-Buchse verwendet, da diese zum Zeitpunkt der Arbeit dem neuesten Stand der Technik entspricht. Für maximale Kompatibilität sind die CC1 und CC2 Anschlüsse des USB-C-Ports mit jeweils einem 5,1 k Ω Widerstand nach Masse versehen. Diese Angabe wird aus einem Dokument von Microchip Technology entnommen (vgl. [12], S. 10, Tab. 7). Die Versorgungsspannung ist mit einer automatisch rücksetzenden Positive Temperature Coefficient (PTC)-Sicherung abgesichert. Die Platine wird über die 5 V Spannung des USB Ports gespeist. Analog zum UART-Header ist ebenfalls eine Diode vorgesehen (siehe. Abschnitt 3.7.1.2).

Das Dioden-Array D8 stellt den Electrostatic Discharge (ESD)-Schutz sicher. Hierbei handelt es sich um ein spezialisiertes Bauteil mit besonders niedriger parasitärer Kapazität, welches wichtig ist für die hohen Datenraten des USB 2.0 Bus (vgl. [8], S. 1). Der CP2102N-IC stellt die USB-zu-UART-Brückenfunktionalität zur Verfügung. Der USB-zu-UART-IC benötigt einen Spannungsteiler, der die Versorgungsspannung, die vom USB-Port bereitgestellt wird, am „VBUS“-Pin auf einen definierten Wert herunterteilt. Die Dimensionierung der Widerstände kann dem Datenblatt entnommen werden (vgl. [17], S. 7).

Außerdem ist im CP2102N-IC ein 3,3 V Linearregler integriert (vgl. [17] S. 1). Die 3,3 V und 5 V Spannungen sind mit jeweils zwei Abblockkondensatoren versehen. An den Receive (RX) und Transmit (TX)-Datenleitungen sind LEDs angeschlossen, die bei Busaktivität aufleuchten. Da der Bus im Ruhezustand auf 5 V liegt, sind die LEDs so angeschlossen, dass sie aufleuchten, wenn ein Datenpin auf Massepotential ist.

Die GPIO-Spannung des Mikrocontrollers beträgt 5 V, die der UART-Bridge nur 3,3 V. Daher ist ein Spannungsteiler für das vom Mikrocontroller kommende Datensignal vorgesehen, der 5 V auf ca. 3,3 V herunterteilt.

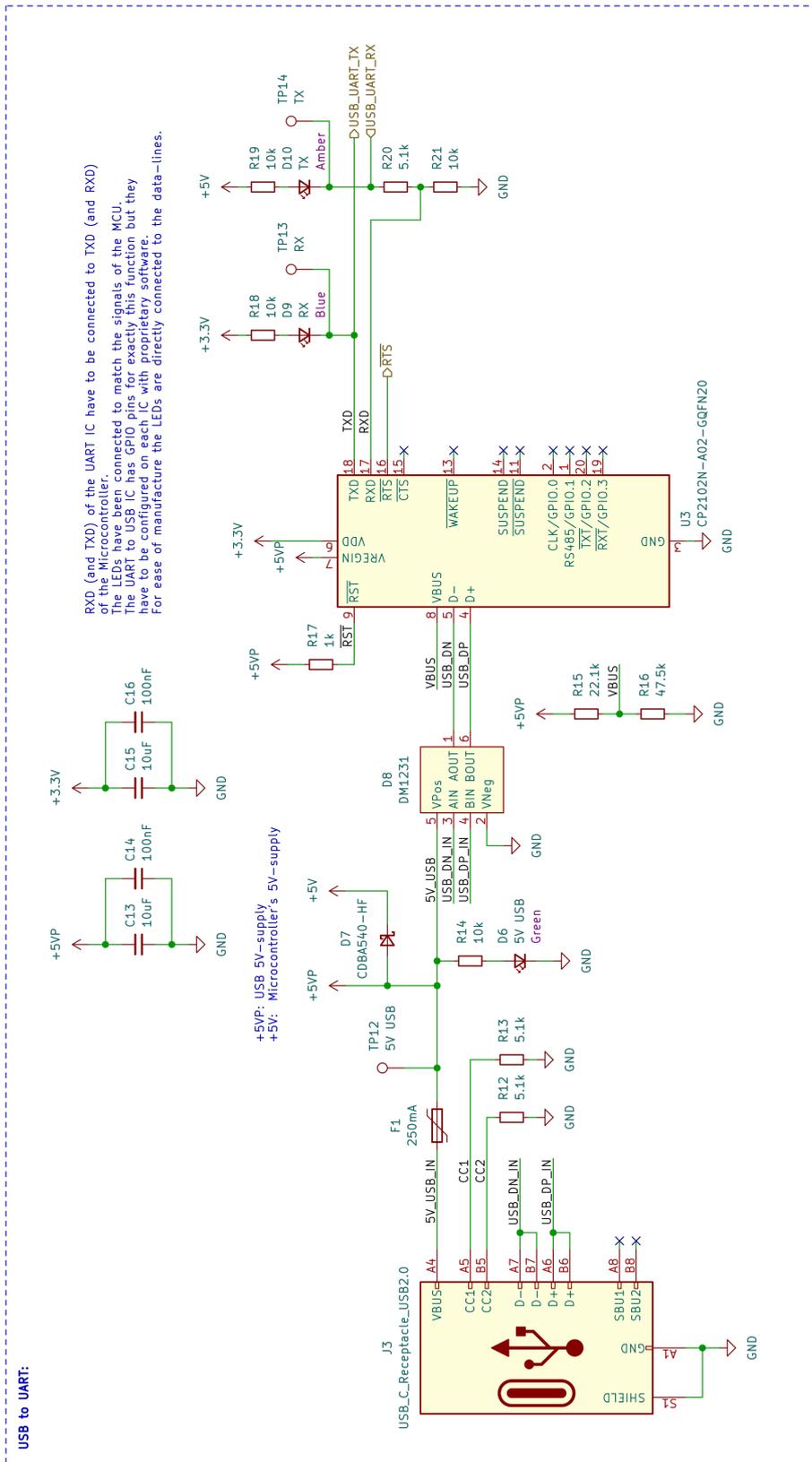


Abbildung 36: USB-zu-UART-Brücke

3.7.4 Interface zum Auto und dem elektronischen LMM

Die Abb. 37 zeigt den Stecker, über den die Platine am Motorsteuergerät angeschlossen werden kann. Über diesen wird die Platine mit 12 V versorgt. Die Versorgungsspannung ist mit einer automatisch rücksetzenden PTC-Sicherung abgesichert.

Unmittelbar danach ist eine Transient Voltage Suppressor (TVS)-Diode vorgesehen. Diese schützt die Elektronik der Platine vor elektrostatischen Entladungen (ESD) und sonstigen kurzen Überspannungen.

Das Diodenarray D12 besteht aus Zenerdioden und schützt vor ESD und Überspannung auf den Datenpins.

Im mechanischen Luftmengenmesser ist eine Diode zwischen den Kontakten mit den Nummern 6 (Masse) und 36 (Schaltkontakt) integriert (siehe Abb. 10). Um eine äquivalente Schaltung zu erreichen, wird diese daher auch von dieser Platine, in Form der Diode D14, integriert.

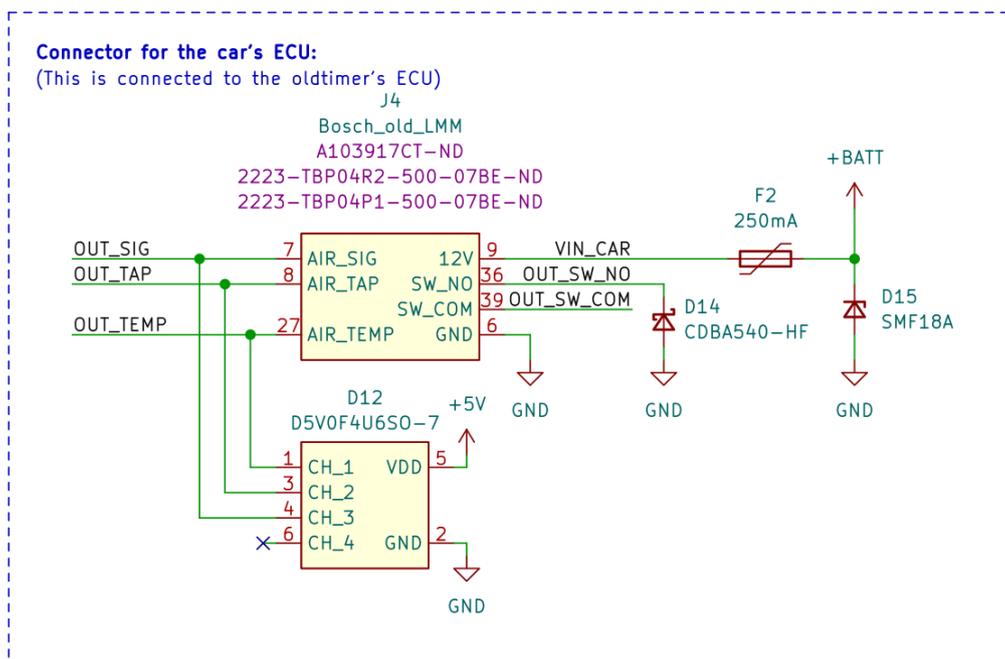


Abbildung 37: Stecker zum Motorsteuergerät

Analog zur soeben erläuterten Schaltung ist auch der Stecker zum elektronischen Luftmassenmesser mit einem solchen TVS-Array geschützt (siehe Abb. 38).

Da der LMM eine Referenzspannung benötigt, wird diese von der Platine bereitgestellt und zusätzlich gefiltert.

An der Signalleitung des NTC-Thermistors ist eine kleine Kapazität angeschlossen, die in Kombination mit der verhältnismäßig hohen Impedanz der restlichen Schaltung einen Tiefpass bildet.

Das analoge Luftmassensignal ist ebenfalls mit einem Tiefpass versehen.

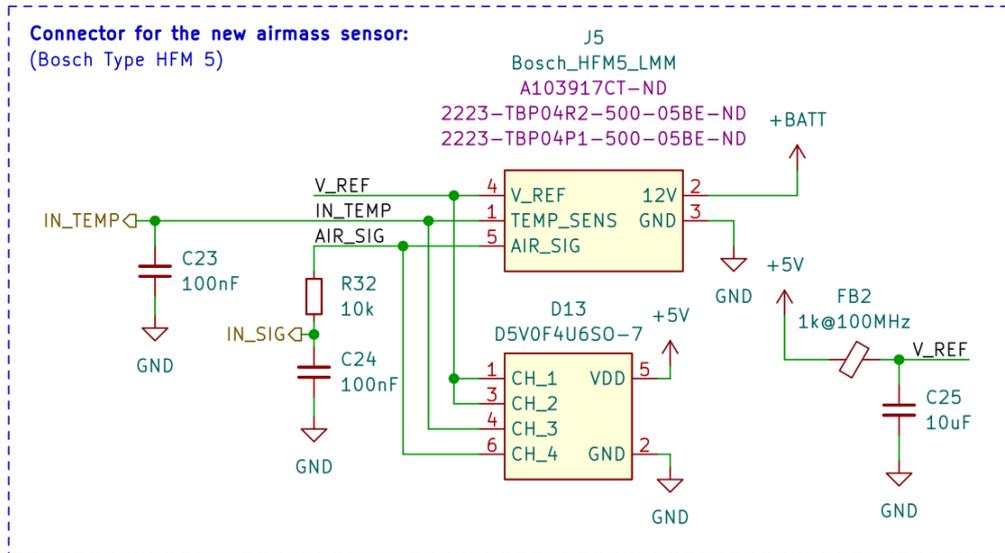


Abbildung 38: Stecker zum elektronischen Luftmassenmesser

3.7.4.1 NTC-Thermistor

Über den Schalter SW4 (siehe Abb. 39) kann selektiert werden, ob der NTC-Thermistor des elektronischen LMMs direkt am Motorsteuergerät angeschlossen ist oder ob das von der Platine nachgebildete Signal genutzt wird.

Sofern das nachgebildete Signal verwendet wird, so muss der Mikrocontroller die Temperatur durch eine ADC-Messung des NTC-Thermistors im elektronischen LMM bestimmen. Zu diesem Zweck ist ein Pull-Up Widerstand, welcher aus zwei 1 k Ω großen Widerständen zusammengesetzt ist, vorhanden (R33 und R34 auf Abb. 39). Dieser Pull-Up Widerstand ist in Serie zum NTC-Thermistor geschaltet. In der Mitte wird das Signal abgegriffen und mit dem ADC gemessen. Die äquivalente Schaltung ist auf Abb. 40 dargestellt. R1 entspricht R33 + R34 auf Abb. 39.

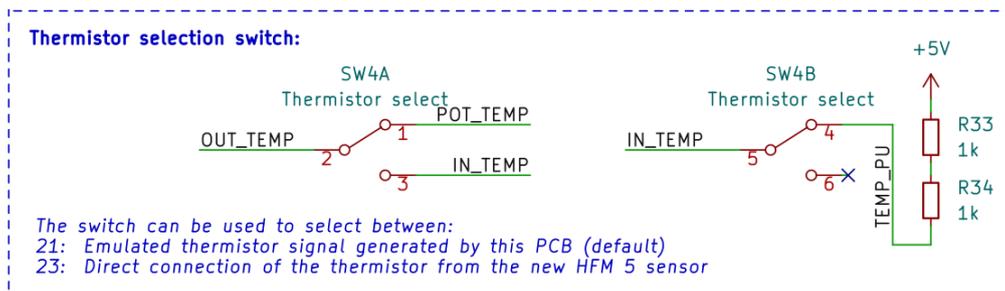


Abbildung 39: Wahlschalter Thermistor

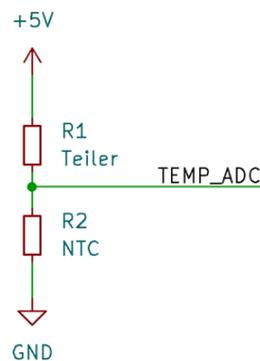


Abbildung 40: Äquivalente Thermistor-Messschaltung

3.7.4.2 Bestimmung des optimalen Teilerwiderstands

Die Größe des Teilerwiderstands R1 (siehe Abb. 40) ist wichtig, um eine möglichst gute Auflösung der Temperaturmessung im gewünschten Bereich zu erzielen.

Zu diesem Zweck wurden im Tabellenkalkulationsprogramm Excel Berechnungen durchgeführt (siehe Abb. 41). Es wurden zwei einstellbare Parameter implementiert. Die Zahl der Bits, die der ADC aufweist müssen angegeben werden. Außerdem wird ein Wert für R1 angegeben. Durch die Änderung dieses Wertes kann anhand eines Funktionsgraphen abgelesen werden (siehe Abb. 42 und 43), ob dieser Wert für R1 geeignet ist. Durch iteratives Ändern des Wertes R1 kann ein Optimum ermittelt werden.

Es wurden die Widerstandswerte des NTC aus der Grafik im Datenblatt (siehe Abb. 18) übernommen. Diese wurden in die zweite Spalte auf der Abb. 41 eingefügt. Im Anschluss wurde auf Basis dieser Werte und der Angaben zur ADC-Auflösung und dem Wert für R1 berechnet, welchen Wert der ADC messen würde (Spalte 3). Auf Grundlage dieser Berechnung wurde ermittelt, wie groß die Änderung zum vorherigen Temperaturwert ist (Spalte 4). Je größer die Änderung ist, desto empfindlicher arbeitet die Schaltung in diesem Temperaturbereich.

Diese Information wird in einem Koordinatensystem visualisiert. Die Abb. 42 und 43 zeigen zwei Ergebnisse mit verschieden großem R1. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass Abb. 42 das bessere Ergebnis zeigt.

Laut dem Statistischen Bundesamt betrug die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland im Jahr 2021 9,1 °C (vgl. [18]). In etwa bei diesem Wert weist die Grafik auf Abb. 42 das Maximum auf. Somit ist ein Teilerwiderstand von 2 kΩ für R1 optimal.

Bosch HFM 5				ADC Bits	1024
Temperatur	Widerstand	ADC Wert	Δ ADC zum Vorgänger	ADC max. Wert	1023
-40	39260	973,41202	0		
-30	22960	941,02885	32,38317517	Teilerwiderstand / Ω	2000
-20	13850	893,91483	47,11401966	Speisespannung / V	5
-10	8609	830,14488	63,76994951		
0	5499	750,16362	79,98125517	durchschn. Δ ADC im markierten Bereich	81,890417
10	3604	657,90364	92,25998156	je größer, desto besser!	
20	2420	560,10407	97,79956786		
30	1662	464,28891	95,81515924	Jahresmitteltemperatur in Deutschland / °C	9,1
40	1166	376,75869	87,53022712		
50	835	301,30688	75,45180773		
60	609	238,79149	62,51538731		
70	452	188,57912	50,21237191		
80	340	148,64103	39,93809345		
90	261	118,09067	30,55035779		
100	202	93,844687	24,2459812		
110	159	75,339046	18,50564079		
120	127	61,081805	14,25724049		
130	102	49,641294	11,44051135		
			je größer, desto besser!		
RELEVANTER BEREICH					
Außerhalb dieses Bereichs wird das Fahrzeug nur in seltenen Fällen betrieben. Daher kann die Genauigkeit der Messung auf den relevanten Bereich optimiert werden.					

Abbildung 41: Tabelle zur Ermittlung des optimalen Werts für R1

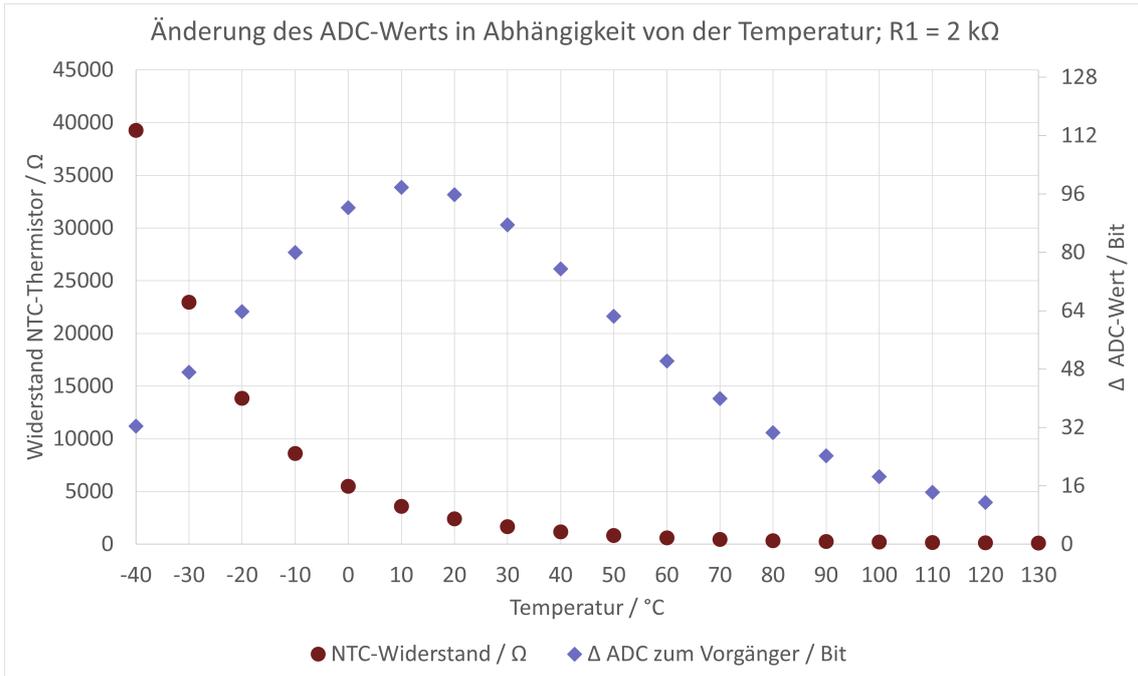


Abbildung 42: Funktionsgraph mit optimalem Wert für R1

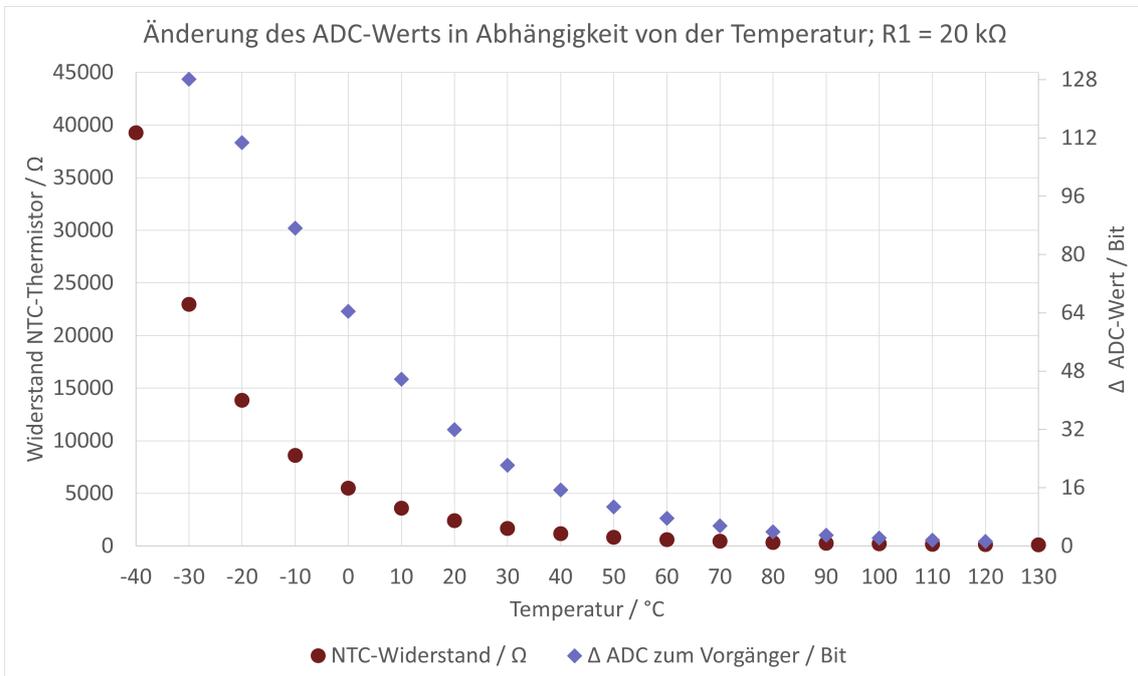


Abbildung 43: Funktionsgraph mit suboptimalem Wert für R1

3.7.4.3 Schaltung zur Nachbildung des Luftmengensignals

Die Abb. 44 zeigt die Schaltung, mit der das nachgebildete Luftmengensignal an das Steuergerät ausgegeben wird. Die Schaltung besteht aus drei Blöcken. Zunächst wird das „Tap“-Signal gebildet. Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben, kann dieses mit Hilfe eines einfachen Spannungsteilers gebildet werden. Die Widerstandswerte sind in Summe genauso groß, wie die im mechanischen LMM verbauten Widerstände.

Es wird zusätzlich zum „Tap“-Signal auch noch eine zweite Spannung aus dem Spannungsteiler abgeleitet. Bei dieser handelt es sich um die Referenzspannung des DACs. Die maximal zulässige Referenzspannung des DACs liegt unter der maximal erforderlichen Ausgangsspannung. Somit ist eine Reduktion nötig. Die Werte sind so dimensioniert, dass der DAC bis zu einer maximalen Spannung $+BATT = 16\text{ V}$ arbeiten kann, ohne beschädigt zu werden. Durch ein Anpassen der Verhältnisse (R_{23} und R_{24}) könnte eine noch höhere maximale Betriebsspannung ermöglicht werden. Das Ausgangssignal des DAC wird in eine nicht-invertierende OPV-Schaltung geleitet, die eine Verstärkung $= 2$ besitzt.

Der DAC wurde gewählt, da dieser IC einen externen Referenzspannungseingang besitzt und mit 10 Bit eine ausreichende Auflösung bietet.

Bei dem OPV handelt es sich um einen Rail-To-Rail OPV, auch wenn dies in dem konkreten Anwendungsfall nicht nötig wäre. Die Ausgangsspannung „OUT_SIG“ muss von diesem nie komplett bis zur positiven oder negativen Versorgungsspannung getrieben werden. Durch die Rail-To-Rail-Charakteristik besteht allerdings die Möglichkeit hierzu, die ggf. bei bestimmten Modellen des mechanischen Luftmengensensors nötig sein könnte.

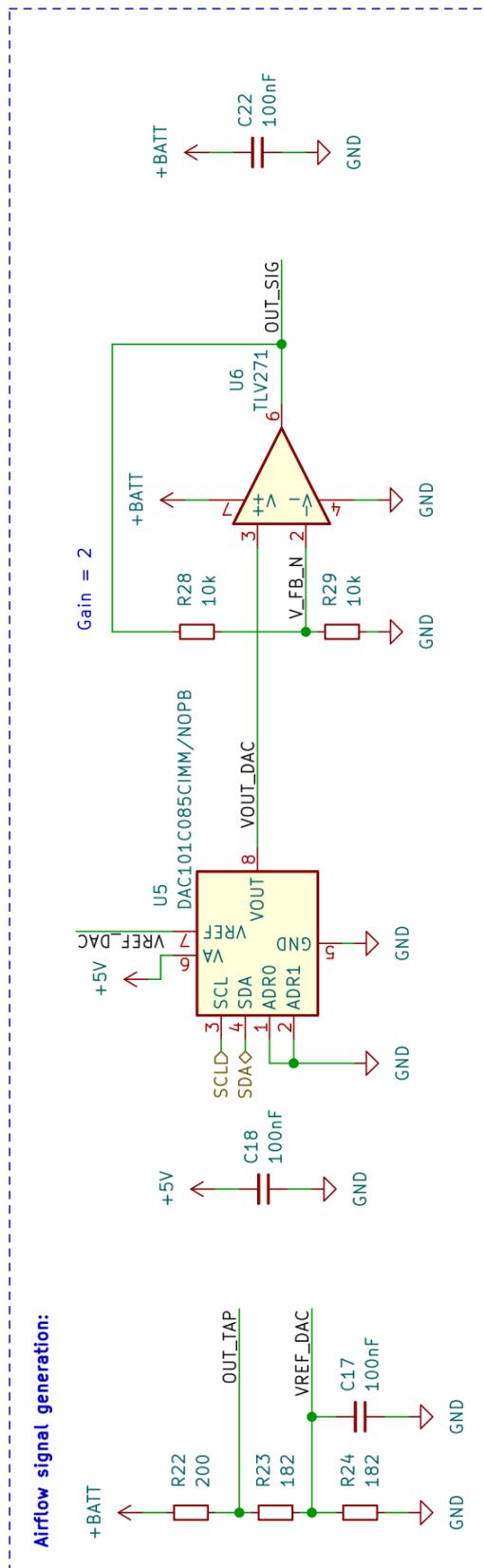


Abbildung 44: DAC und OPV zur Nachbildung des Luftmengen-signals

3.7.4.4 Digitalpotentiometer zur NTC-Nachbildung

Die Abb. 45 zeigt die Schaltung, mit der der NTC-Thermistor nachgebildet werden kann. Das Digitalpotentiometer arbeitet mit zwei Betriebsspannungen. Die Versorgungsspannung für den digitalen Teil beträgt 5 V. Der analoge Teil arbeitet mit einer separaten Spannung. Diese ist in diesem Anwendungsfall höher, da es sich um die vom Fahrzeug bereitgestellte Spannung handelt.

Bei der Messung des NTC-Werts legt das Motorsteuergerät ca. 9 V an den Thermistor an. Daher war es nötig einen Digitalpotentiometer-IC zu wählen, der mit dieser verhältnismäßig hohen Spannung arbeiten kann.

Es wurde erneut das Tabellenkalkulationsprogramm Excel verwendet, um zu überprüfen, ob die Auflösung von 8 Bit für eine ausreichend hochauflösende Nachbildung genügt (siehe Abb. 46). Zunächst wird die Funktionsgleichung für den Widerstand des NTC-Thermistors in Abhängigkeit von der Temperatur angenähert. Zu diesem Zweck wurde das Programm Graph verwendet (siehe Abb. 46). Als Basis diente die im Datenblatt aufgeführte Kennlinie (vgl. [10], S. 2).

Die ermittelte Funktionsgleichung wurde in Excel verwendet, um eine Vielzahl von Widerstands- und Temperatur-Wertepaaren zu ermitteln. Auf Basis dieser Werte konnte nun in Verbindung mit der Auflösung des Digitalpotentiometers eine Grafik erzeugt werden. Die Abb. 48 und 49 zeigen, inwieweit sich die Auflösung des Digitalpotentiometers auf die Auflösung des nachgebildeten Thermistorsignals auswirkt. Je kleiner der Sprung in der äquivalenten Temperatur (ΔT) zwischen zwei Einstellungen des Digitalpotentiometers ist, desto höher ist die Auflösung in diesem Bereich. Es ist zu erkennen, dass eine Auflösung von 1024 Stufen zu bevorzugen wäre. Eine Auflösung von 256 Stufen zeigt im relevanten und zu erwartenden Temperaturbereich dennoch akzeptable Werte. Die Auflösung des Digitalpotentiometers ist mit 256 Stufen nicht hoch, aber dennoch ausreichend gut. Da es kein alternatives, passendes Bauteil gab, wurde das Digitalpotentiometer mit 256 Stufen gewählt.

Eine Kalibrierung in Software kann nötig sein, da die Toleranz des Gesamtwiderstands bei dem gewählten Digitalpotentiometer bei +/- 30 % liegt (vgl. [1], S. 3).

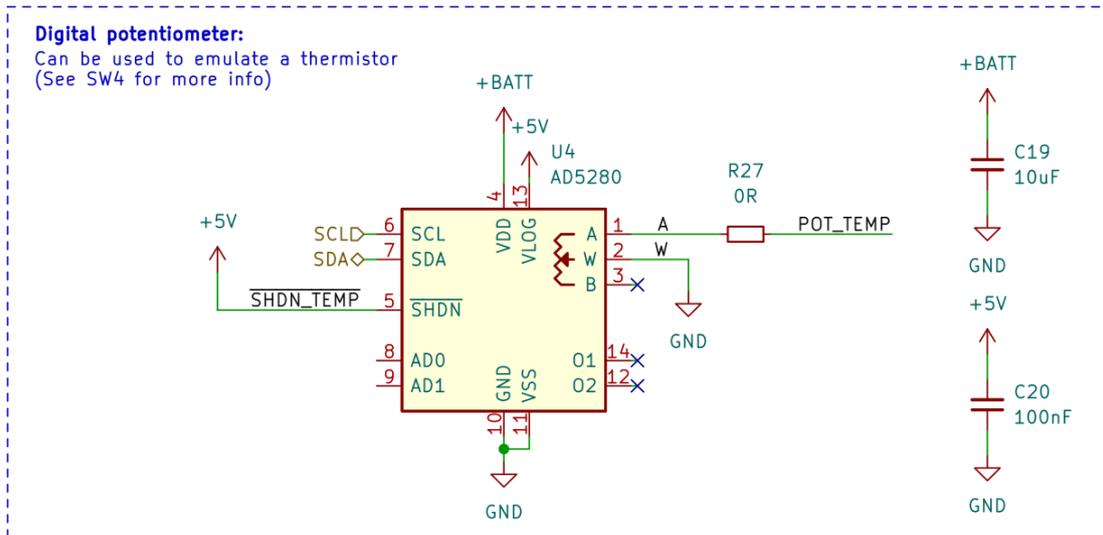


Abbildung 45: Schaltung zur Nachbildung des NTC-Thermistors

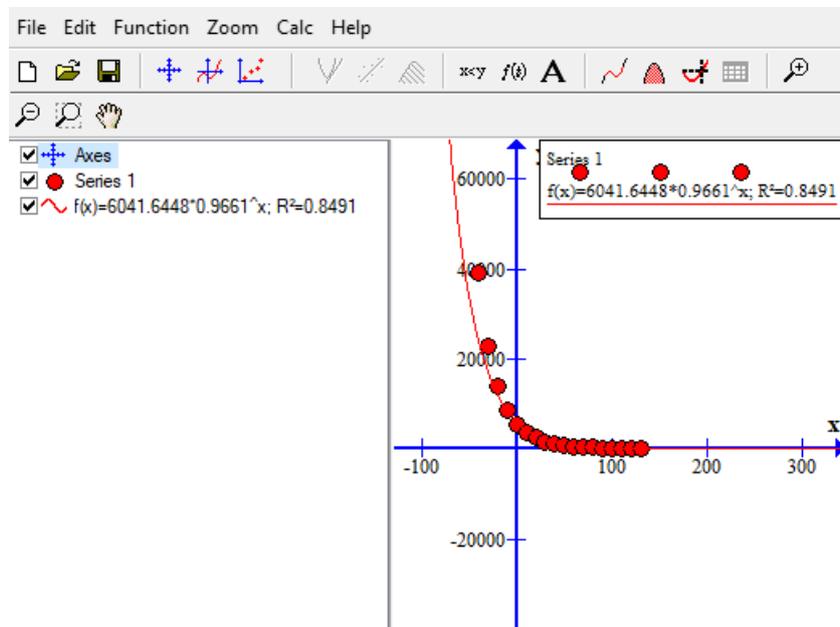


Abbildung 46: Bestimmung einer Funktionsgleichung für den NTC-Thermistor

Bosch HFM 5		Digi Pot		Einstellung		Widerstand / Ohm		entsp. Temperaturwert laut Annäherung		Δ T zum Vorgänger	
Temperatur	Widerstand	Zahl Bits	Auflösung	Poti Gesamtwiderstand	8	256 Schritte	50000	#ZAHL!	NA		
-40	39260							99,50816672		20,09825378	
-30	22960							79,40991294		11,75672477	
-20	13850							67,65318817		8,341528954	
-10	8609							59,31165922		6,470192511	
0	5499							52,84146671		5,286532199	
10	3604							47,55493451		4,46969278	
20	2420							43,08523523		3,87182962	
30	1662							39,21340561		3,415195755	
40	1166							35,79820986		3,054996699	
50	835							32,74321316		2,763580667	
60	609							29,97963249		2,522951475	
70	452							27,45668101		2,320890371	
80	340							25,13579064		2,14880885	
90	261							22,98698179		2,000493176	
100	159							19,11515223		1,871336387	
110	127							17,3573019		1,757850328	
130	102							15,69995653		1,567714229	
Angaben aus dem Datenblatt für HFM 5											
angemäherte Funktionsgleichung											
$f(x) = 6041,6448 \cdot 0,9661^x$											
Temperatur	Widerstand	Abweichung	Schlussfolgerung / Legende								
-40	24003,3526	15256,6474	Von ca. -10°C bis 110°C liefert die Annäherung plausible Werte.								
-30	17001,7147	5958,28525									
-20	12042,4138	1807,5862									
-10	8529,712	79,2880034									
0	6041,6448	-542,6448									
10	4279,33228	-675,33228									
20	3031,07604	-611,07604									
30	2146,92885	-484,92885									
40	1520,68224	-354,68224									
50	1077,10811	-242,10811									
60	762,921959	-153,92196									
70	540,382077	-88,382077									
80	382,75578	-42,75578									
90	271,108153	-10,108153	Außerhalb des Bereichs								
100	192,027488	9,97251249									
110	136,01419	22,9858096									

Abbildung 47: Berechnung der Auflösung der Nachbildung des NTC-Thermistors

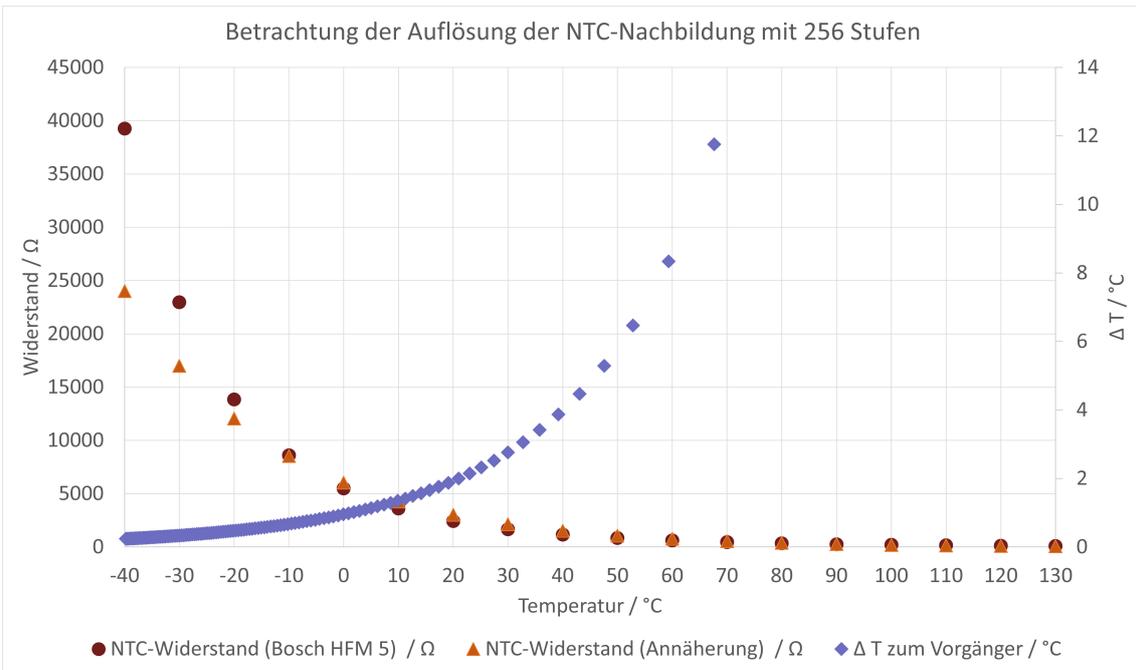


Abbildung 48: Funktionsgraph für eine Auflösung von 256 Stufen

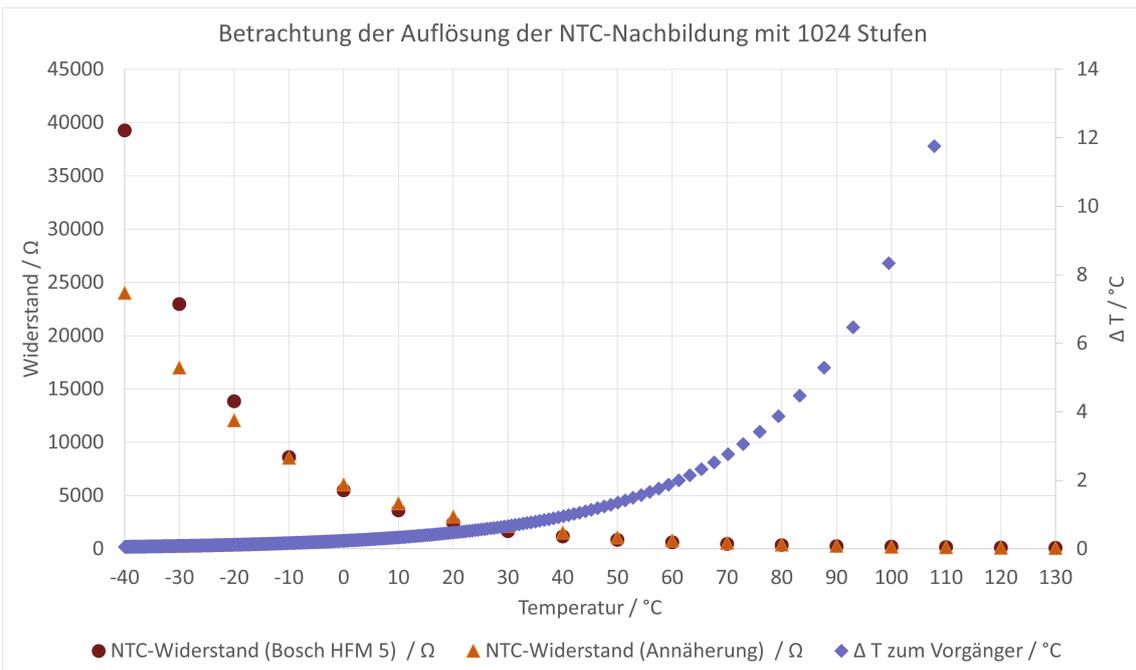


Abbildung 49: Funktionsgraph für eine Auflösung von 1024 Stufen

3.7.4.5 Relais für Schaltkontakt mech. LMM

Über das Relais K1 (siehe Abb. 50) wird der Schaltkontakt, der im mechanischen LMM existiert, nachgebildet. Das Relais kann per Software über einen GPIO-Pin geschaltet werden. Ein NPN-Transistor schaltet den verhältnismäßig hohen Strom der Relaisspule. Die Diode D11 und der Widerstand R25 schützen den Transistor im Ausschaltmoment, da in diesem eine hohe Spannung durch das zusammenbrechende Magnetfeld der Relaisspule erzeugt wird. Der Widerstand R25 begrenzt den Strom und wandelt die Energie der Spule in Hitze um, was dazu führt, dass das Relais früher öffnet, als nur mit der Diode D11. Wenn nur die Diode vorhanden wäre, so wäre der Strom deutlich höher und das Magnetfeld könnte länger aufrecht erhalten werden. Ein zu langsames Öffnen der Schaltkontakte kann langfristig die Schaltkontakte schädigen (vgl. [14], S. 2).

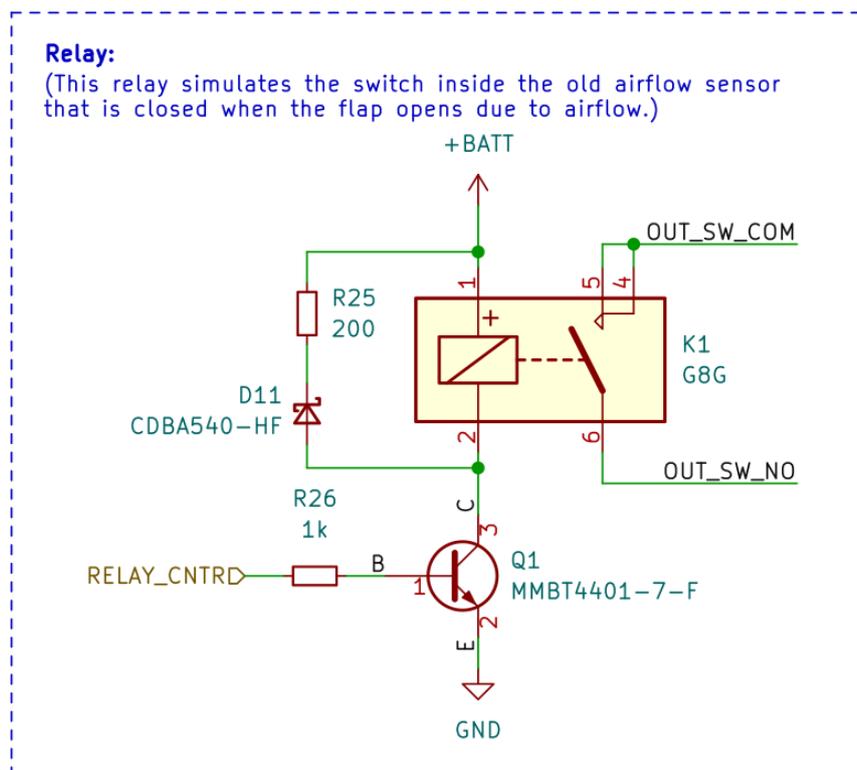


Abbildung 50: Relais für Schaltkontakt der Klappe des mechanischen LMMs

3.7.4.6 Versorgungsspannungsmessung

Der Spannungsteiler (siehe Abb. 51) teilt die vom Fahrzeug bereitgestellte Versorgungsspannung herunter, damit diese mit dem ADC des Mikrocontrollers gemessen werden kann.

Die Widerstände sind so dimensioniert, dass eine maximale Spannung von 16 V gemessen werden kann. Außerdem bilden die Widerstände und die Kapazität einen Tiefpass, um hochfrequente Störungen bereits in Hardware zu filtern.

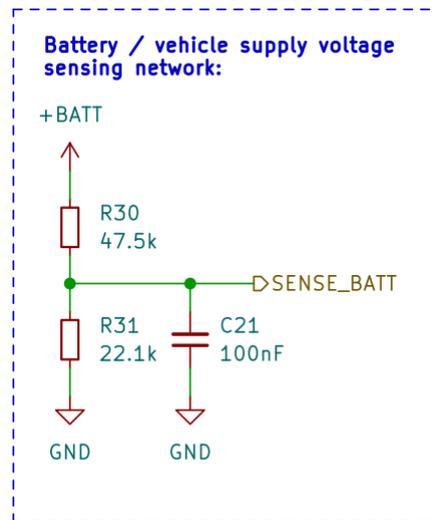


Abbildung 51: Spannungsteiler zur Messung der Versorgungsspannung

3.7.4.7 Testpunkte für Sensorsignale

Über die Testpunkte (siehe Abb. 52) können die relevanten analogen Signale leicht abgegriffen werden.

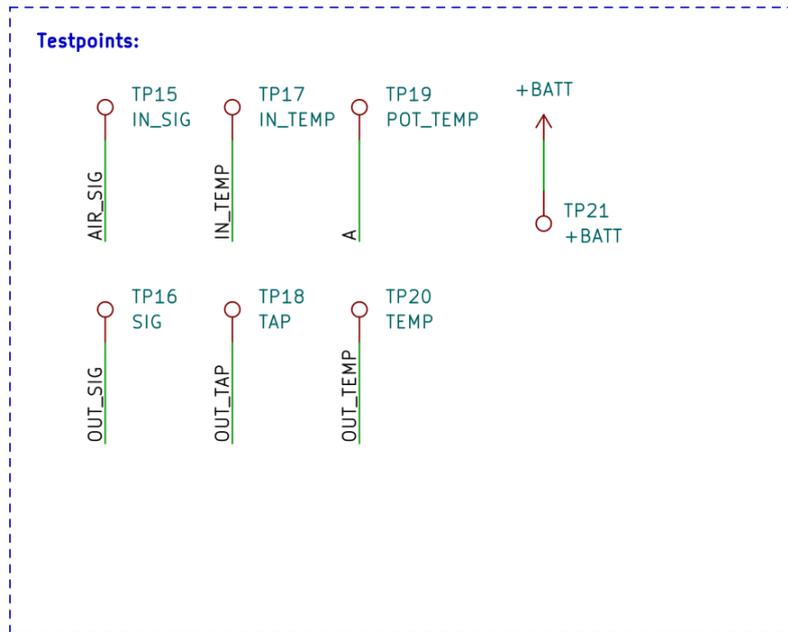


Abbildung 52: Testpunkte: Interface zum Auto und dem elektronischen LMM

3.7.5 Mechanische Elemente

Um die Platine später in ein Gehäuse einbauen zu können, sind an den Ecken der Platine vier M3-Montagelöcher vorhanden (siehe Abb. 53). Außerdem sind vier Fiducials auf der Platine platziert, die es Bestückungsrobotern ermöglichen, optisch die genaue Position der Platine zu erfassen.

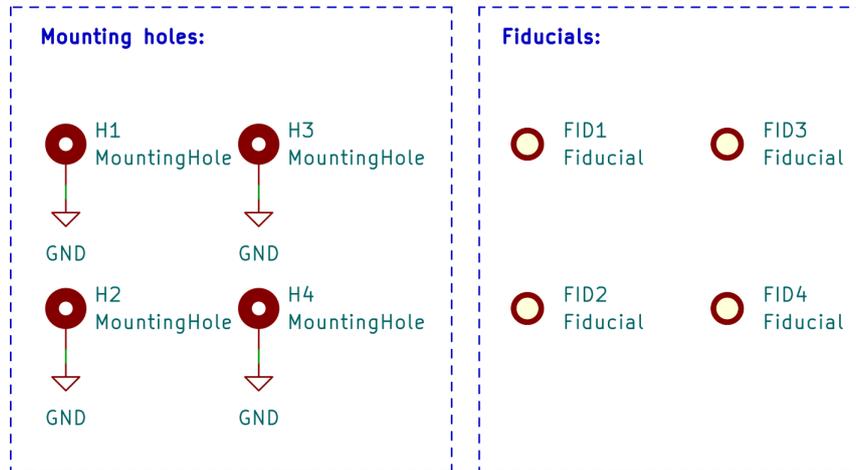


Abbildung 53: Montagelöcher

3.8 Platinenlayout

Dieser Abschnitt behandelt das Platinenlayout, welches auf dem im vorangegangenen Abschnitt erstellten Schaltplan basiert.

3.8.1 Allgemeines

Die Maße der Platine betragen 80mm * 60mm. Die Abb. 54 zeigt ein 3D-Render der Platine. Es handelt sich um eine vierlagige Platine, die aus vier übereinanderliegenden Kupferlagen (Layers) aufgebaut ist. Die beiden äußeren Layer, die von außen sichtbar sind, sind die Top- und Bottom-Layer. Auf diesen Lagen sind die Signale geroutet. Die beiden inneren Lagen bestehen aus einer großen Kupferfläche, die an Masse angeschlossen ist. Eine ununterbrochene Massefläche bietet zahlreiche Vorteile in Bezug auf die Signalintegrität und die EMV-Eigenschaften. Die Masseflächen sind durch zahlreiche Durchkontaktierung (Vias) miteinander verbunden. Gleiches gilt für die Leiterbahnen (Traces) von Signalen, die sowohl auf der Ober- als auch Unterseite geroutet werden mussten.

Die Traces auf der Top-Layer wurden primär vertikal gezogen und die auf der Bottom-Layer horizontal. Eine konsequente Einhaltung dieser Vorgabe vereinfacht den Layoutprozess und führt in der Regel zu wenigen Komplikationen, wenn ein komplexes Design angefertigt werden muss. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte des Layouts genauer betrachtet.

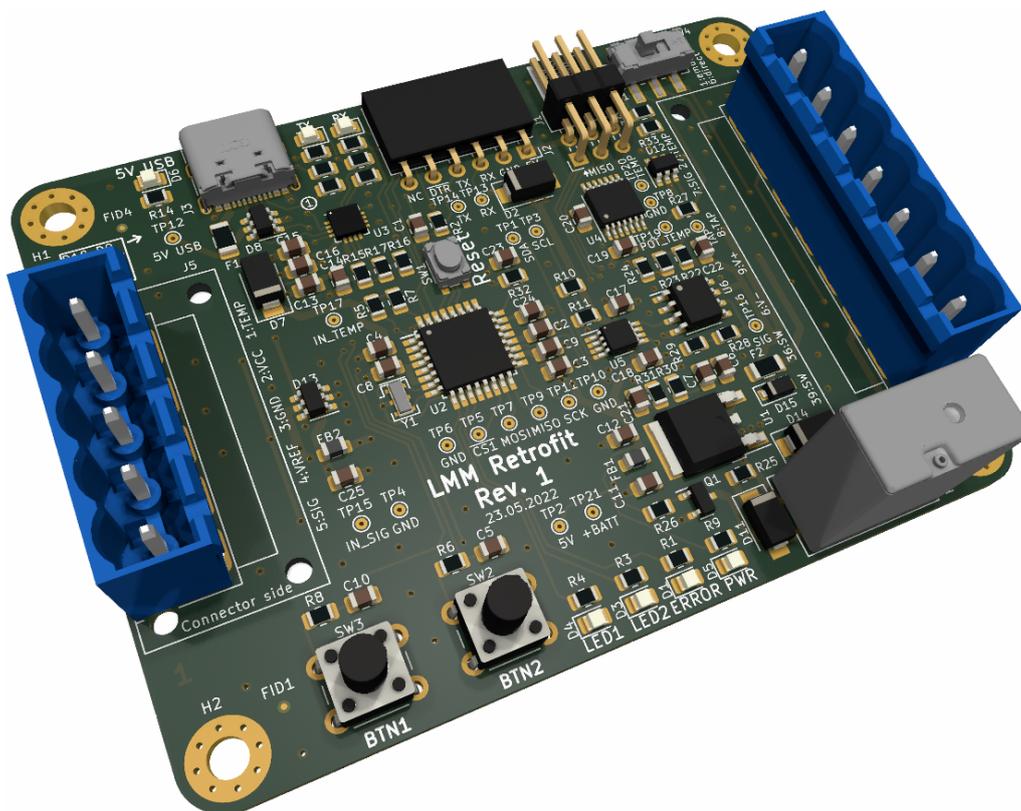


Abbildung 54: 3D-Render der Platine mit Raytracing

3.8.2 Kupferlagen der Platine

Der Übersichtlichkeit halber ist die oberste Kupferlage zweifach dargestellt. Die Abb. 55 zeigt das Layout mit dem sog. Ground-Fill (oder Ground-Pour), bei dem die Massefläche komplett eingefüllt ist. Bei der Herstellung der Platine sind alle Ground-Fills vollständig ausgefüllt. Während der Betrachtung des Layouts hilft es aber, diese nicht zu zeigen. Die Abb. 56 zeigt das Layout der ersten Lage ohne Ground-Fill.

Die Abb. 57 zeigt die Rückseite der Platine ohne den Ground-Fill. Die Abb. 59 und 59 zeigen die beiden inneren Lagen mit Ground-Fill. Auf diesen Lagen sind keine Leiterbahnen für Signale vorhanden.

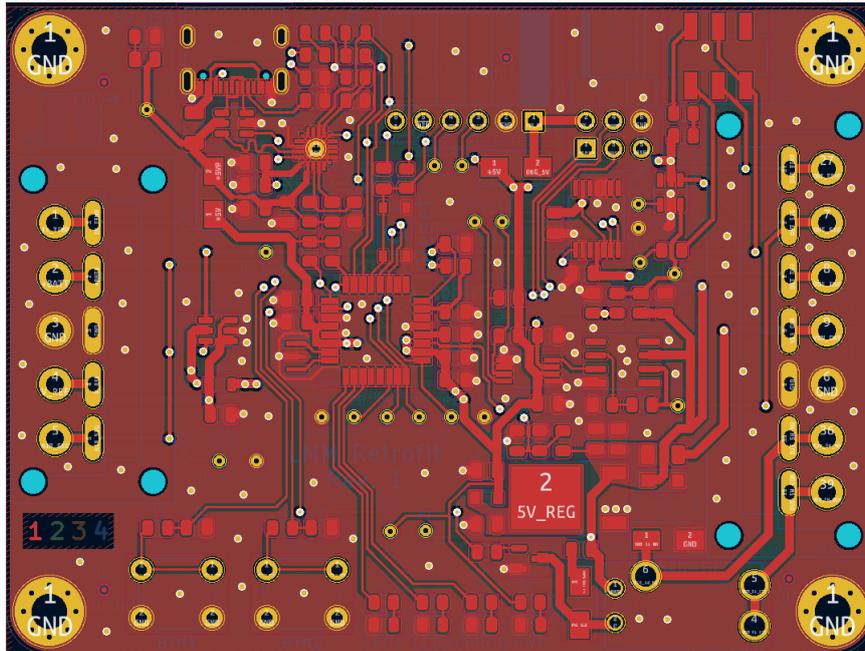


Abbildung 55: Oberste Kupferlage mit Ground-Fill

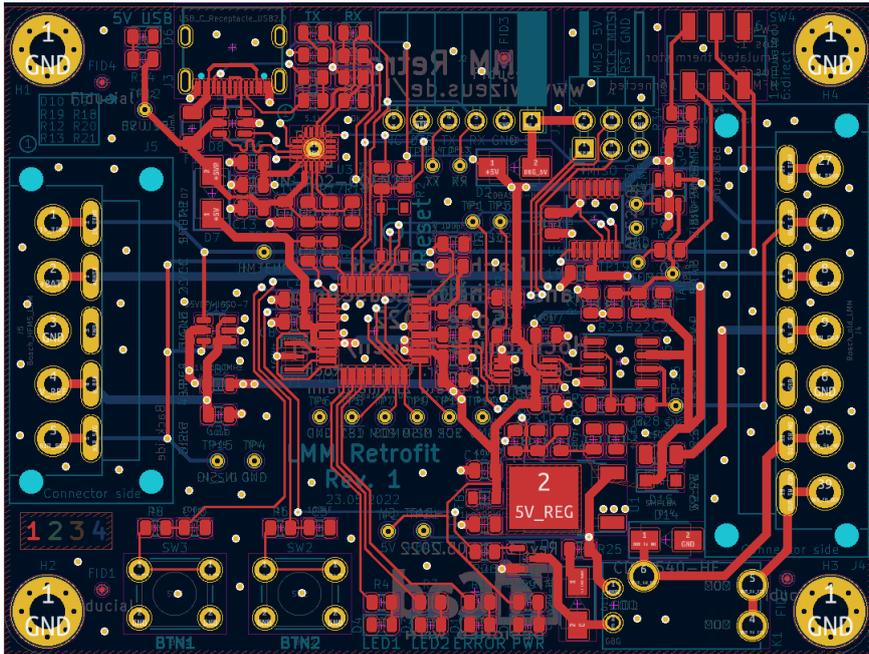


Abbildung 56: Oberste Kupferlage ohne Ground-Fill

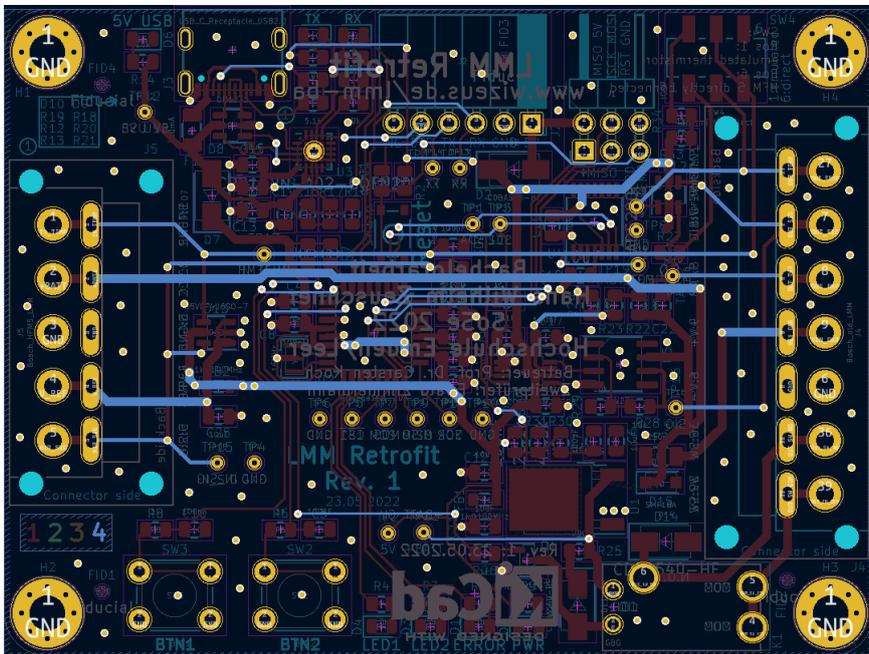


Abbildung 57: Unterste Kupferlage ohne Ground-Fill

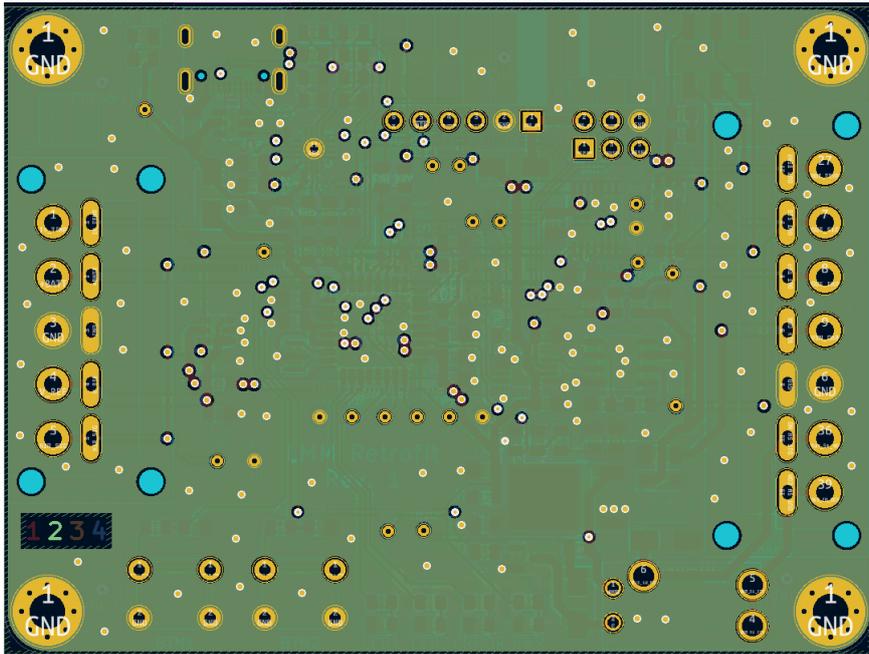


Abbildung 58: Interne Kupferlage 1 mit Ground-Fill

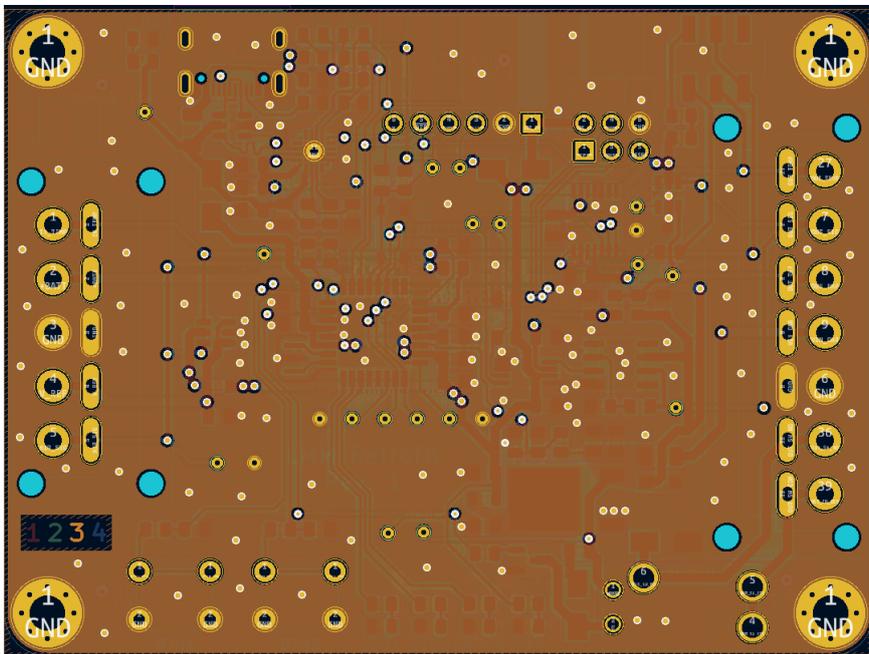


Abbildung 59: Interne Kupferlage 2 mit Ground-Fill

3.8.3 3D-Render der Platine

Auf den Abb. 60, 61 und 62 sind 3D-Render der Platine dargestellt. Die Darstellung der Oberseite, auf der die Komponenten aufgelötet werden, ist sowohl mit (siehe Abb. 60) als auch ohne (siehe Abb. 61) Bauteile dargestellt.

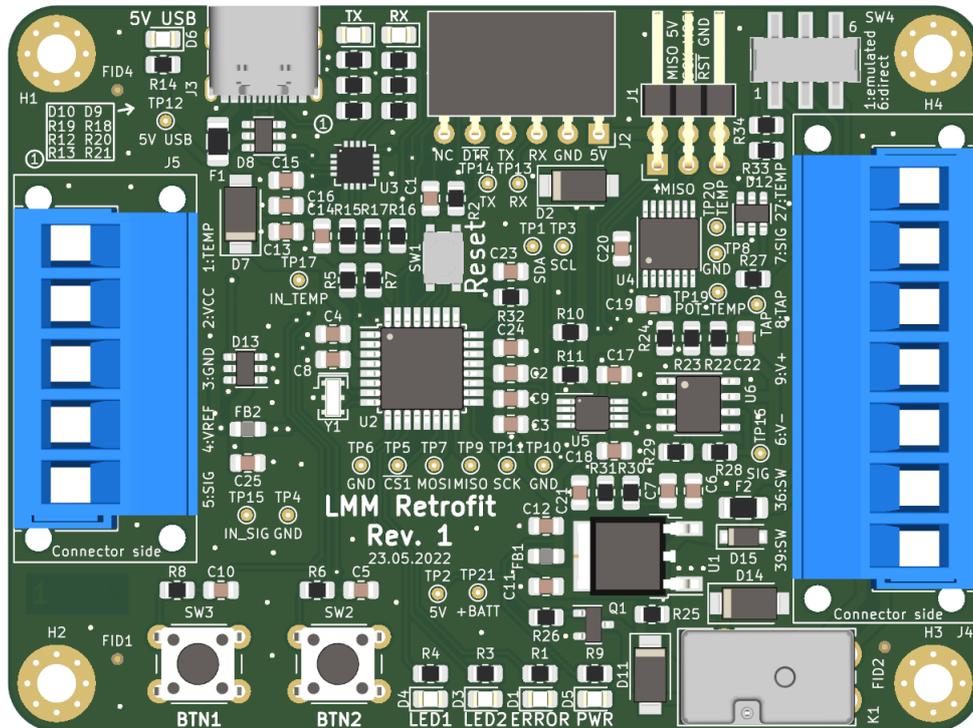


Abbildung 60: Oberseite der bestückten Platine

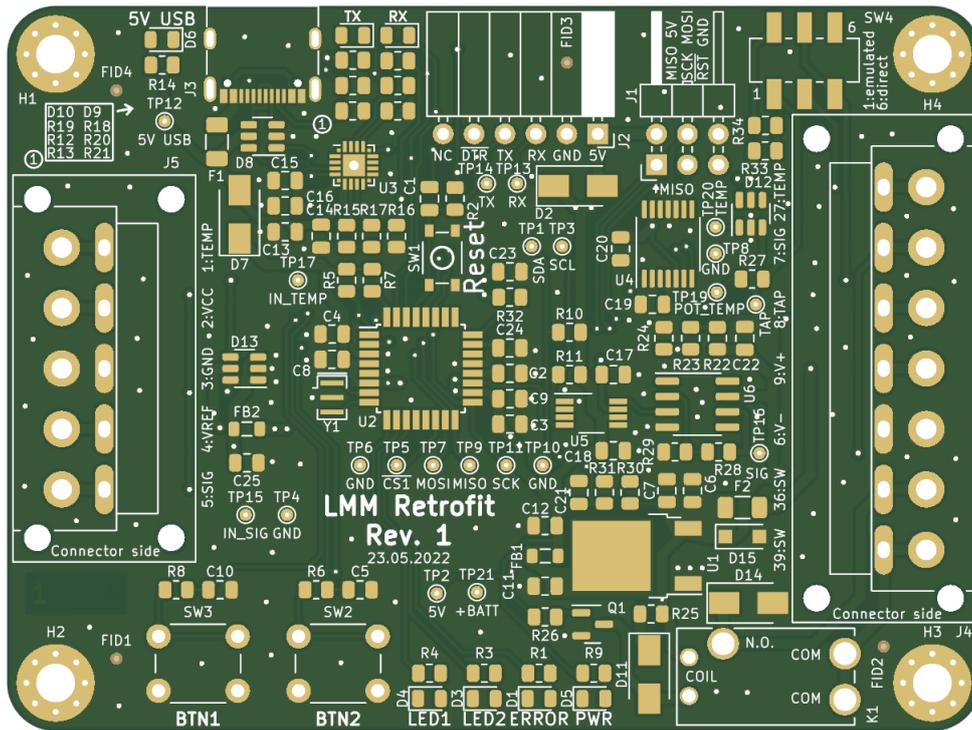


Abbildung 61: Oberseite der unbestückten Platine

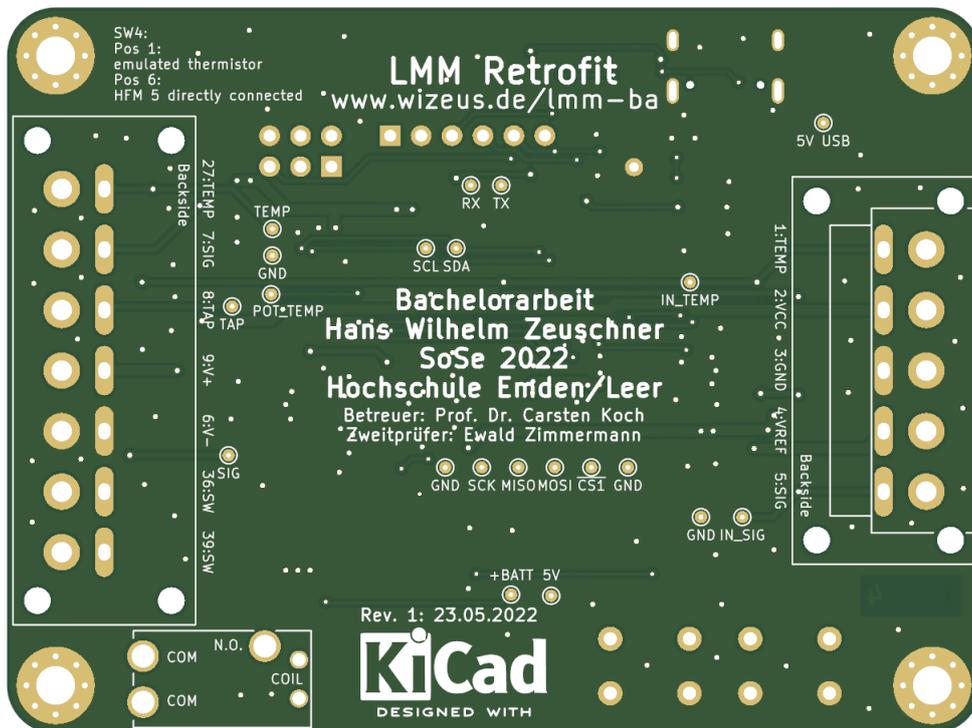


Abbildung 62: Unterseite der Platine

3.8.4 Mikrocontroller und unterstützende Bauteile

In diesem und den folgenden Abschnitten sind die Ground-Fills ausgeblendet, um das Layout auf den Bildern leichter erkennen zu können.

Beim Layout des Mikrocontrollers und unterstützenden Bauteile müssen diverse Details beachtet werden (siehe Abb. 63). Mit Ausnahme des 16 MHz Resonators gibt es keine hochfrequenten Signale. Die beiden Leiterbahnen zum Resonator sind sehr kurz und exakt gleich lang gehalten. (siehe Abb. 64 l. u.)

Die Abblockkondensatoren sind mit sehr kurzen und breiten Leiterbahnen so nah wie möglich an den relevanten Pins des Mikrocontrollers angeschlossen. Außerdem ist pro Masseanschluss, sowohl am Kondensator als auch am Mikrocontroller, mindestens eine Via nach Masse platziert, um eine niederimpedante Verbindung zu den darunterliegenden Masseflächen zu gewährleisten.

Bei den restlichen Signalen (UART etc.) sind keine Besonderheiten zu beachten. Die Traces sind so kurz wie möglich gehalten.

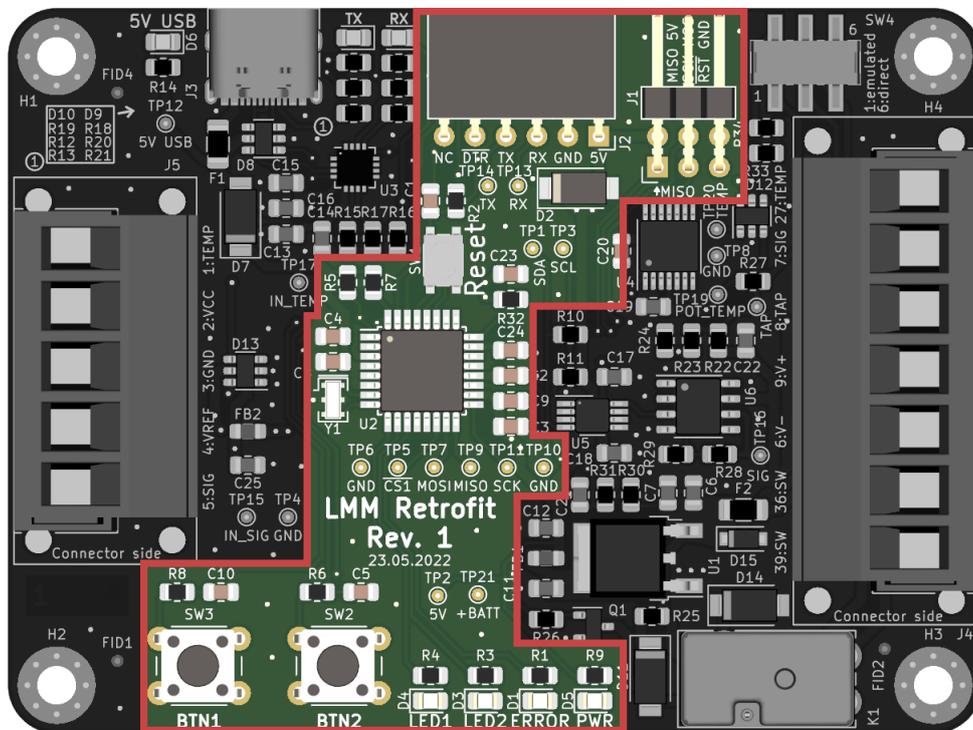


Abbildung 63: Mikrocontroller und unterstützende Bauteile markiert

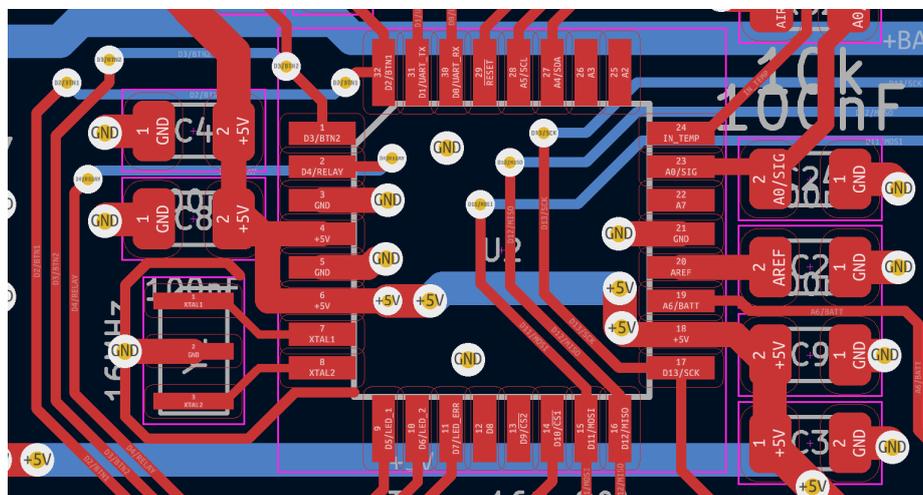


Abbildung 64: Mikrocontroller-Layout im Detail

3.8.5 Lokale Spannungsversorgung

Die Abb. 65 zeigt den Linearregler und die Kondensatoren, sowie den Ferritchip. Beim Layout des Linearreglers wurden mit Kupfer gefüllte Zonen eingesetzt, die mehrere Pads verschiedenerer Bauteile miteinander verbinden (siehe Abb. 66 r. o. und l. u.). Diese Art der Verbindung ist besonders niederimpedant und somit gut für Spannungsversorgungen geeignet. In der Nähe von Massenanschlüssen werden ebenfalls viele Vias eingesetzt.

Die Abb. 67 zeigt, wie die 5 V Versorgung über die Platine verteilt wird. Schleifen werden vermieden. Es ergibt sich eine Baumstruktur. Wenn die Layer gewechselt wird, so kommen zwei Vias zum Einsatz. Teile der Schaltung, in denen nur niedrige Ströme fließen, werden mit dünnen Leiterbahnen realisiert (z. B. LED-Anschlüsse).

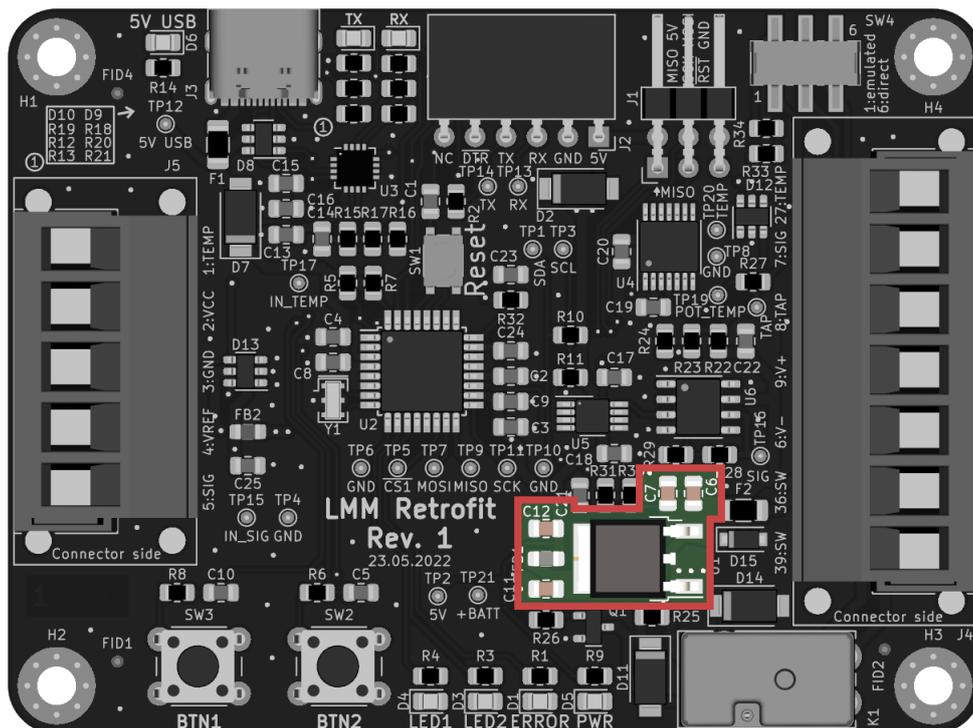


Abbildung 65: Lokale Spannungsversorgung markiert

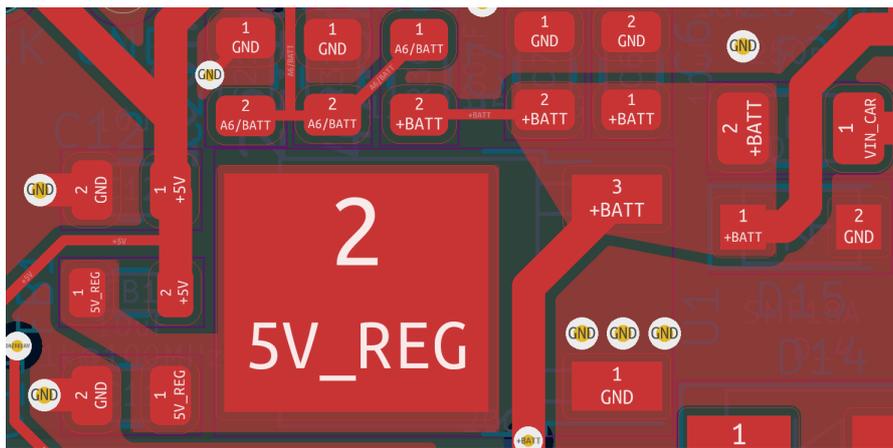


Abbildung 66: Linearregler-Layout im Detail

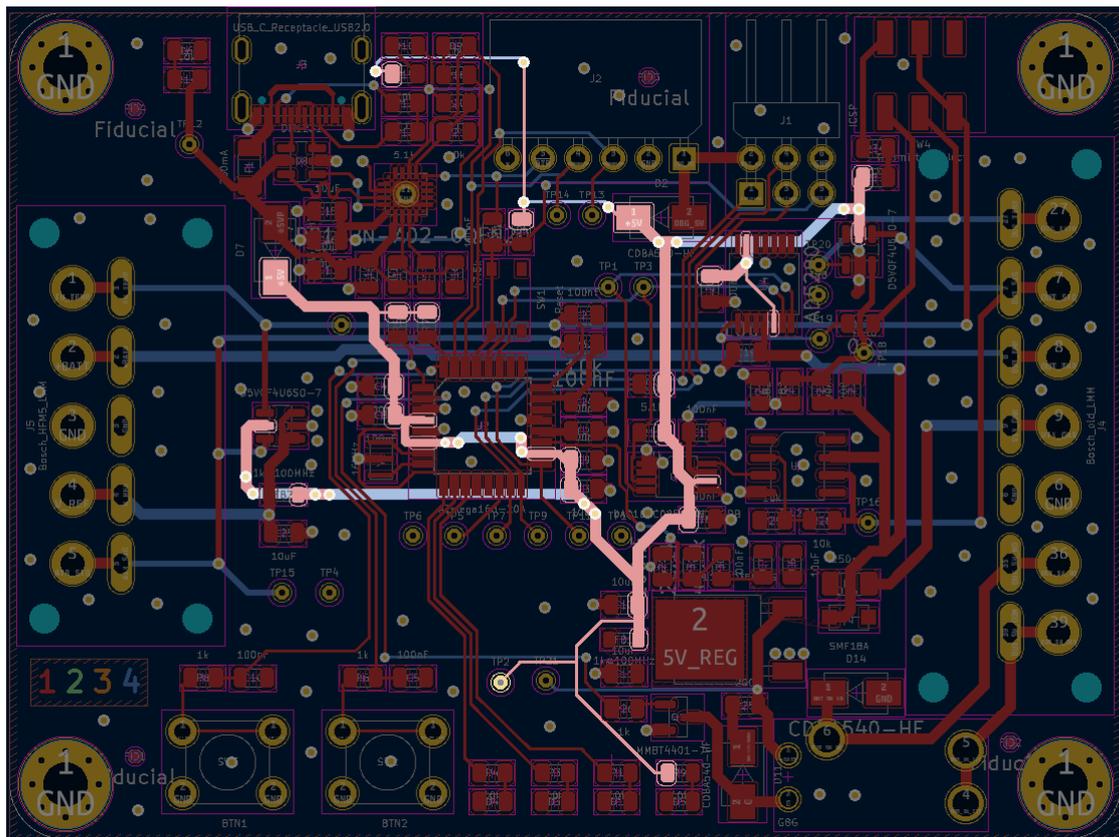


Abbildung 67: Struktur der Spannungsversorgung markiert

3.8.6 Anschlüsse an das Fahrzeug und den elektronischen LMM

Die Leiterbahnen für die leistungsführenden Teile sind breiter ausgeführt, als die für Signale. Die Anschlüsse an das Dioden-Array zur Unterdrückung von Überspannungen werden so kurz und breit wie möglich gehalten.

Im integrierten Footprint-Editor wurde das Footprint für die Anschlüsse so entworfen, dass es möglich ist, diesen mit zwei Arten von Steckverbindern zu nutzen. Zum einen ist es möglich, die auf der Abb. 68 dargestellten Anschlussblöcke zu nutzen. Alternativ können die auf Abb. 69⁵ dargestellten männlichen Pins verwendet werden. Diese gleichen den Pins, die im mechanischen und elektronischen LMM zum Einsatz kommen. Da die Abmessungen der Footprints (siehe Abb. 70) genau den Steckern beider LMM nachempfunden sind, können existierende Kabel verwendet werden. Das Footprint erlaubt es, je nach Bedarf zu entscheiden, welche Art von Verbinder verwendet wird.

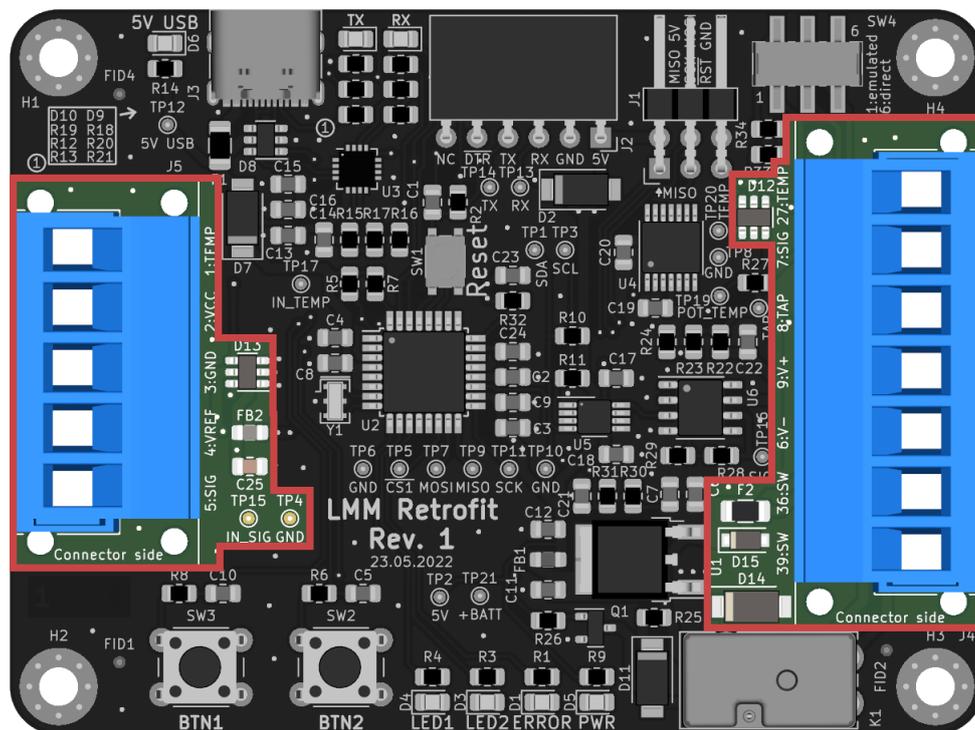


Abbildung 68: Anschlüsse an das Fahrzeug und den el. LMM markiert

⁵Bildquelle: <https://media.digikey.com/Photos/TE%20Connectivity/63756-1.jpg>, Stand Juli 2022



Abbildung 69: Pin für den alternativen Anschluss an das Fahrzeug und den el. LMM



Abbildung 70: Footprint des Steckers zum Motorsteuergerät

3.8.6.1 Relais

Über das Relais (siehe Abb. 71) kann der im mechanischen LMM integrierte Schalter nachgebildet werden.

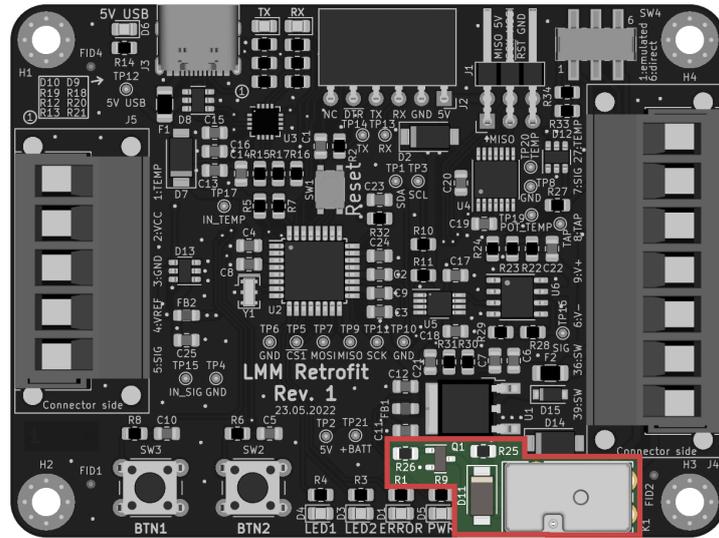


Abbildung 71: Relais markiert

3.8.6.2 Auswahlschalter NTC-Verbindung

Durch Umlegen des Auswahlschalters (siehe Abb. 72) kann zwischen dem direkten Anschluss des Thermistors des elektronischen LMMs an das Motorsteuergerät und dem von der Platine nachgebildeten NTC gewählt werden. Der Schalter ist am Rand der Platine platziert, um ihn ggf. auch durch die Seite einer Gehäuseöffnung zugänglich zu machen.

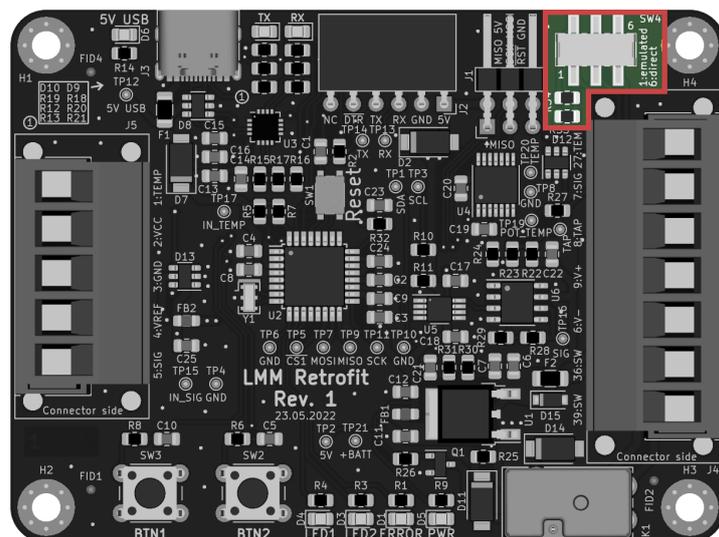


Abbildung 72: Auswahlschalter für die NTC-Verbindung markiert

3.8.7 Nachbildung der Sensorsignale

Die Abb. 73 markiert den DAC und OPV zur Nachbildung des Luftmengensignals. Auf der Abb. 74 ist das Digitalpotentiometer markiert, mit dem der NTC-Thermistor nachgebildet werden kann.

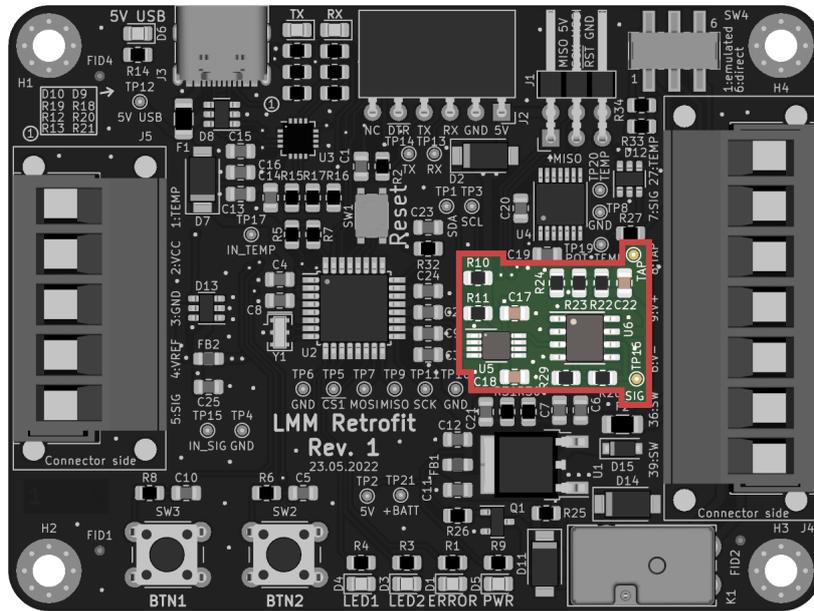


Abbildung 73: DAC und OPV markiert

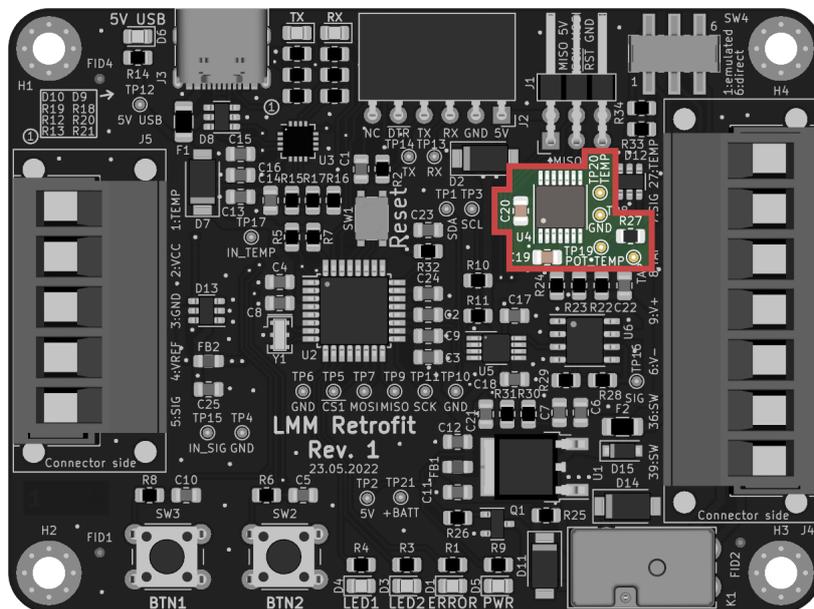


Abbildung 74: Digitalpotentiometer markiert

Die analogen Signale beider Schaltungen sind so kurz wie möglich gehalten (siehe Abb. 75 und 76). Schleifen und große aufgespannte Flächen durch Leiterbahnen werden vermieden. Es kommen zahlreiche Vias zum Einsatz, um eine stets niederimpedante Masseverbindung zu garantieren.

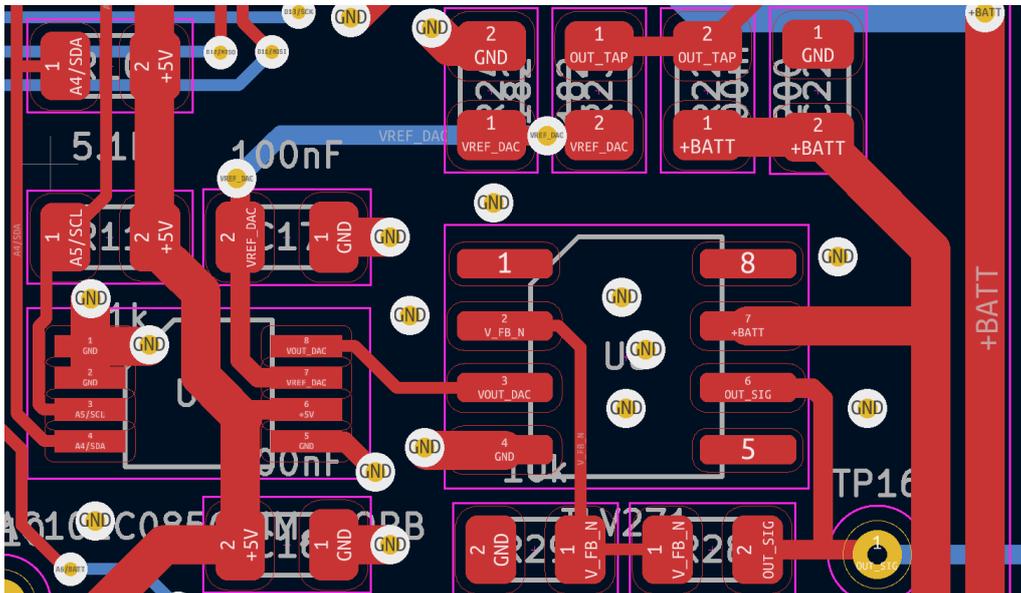


Abbildung 75: Layout des DACs und OPVs markiert

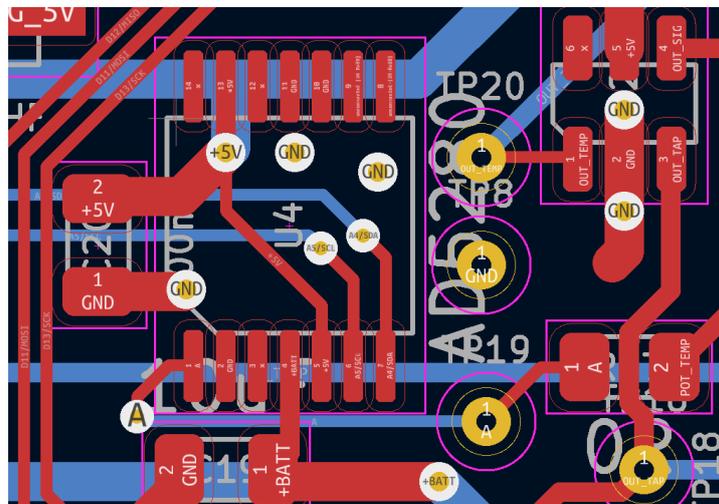


Abbildung 76: Layout des Digitalpotentiometers

3.8.8 USB-zu-UART-Brücke

Da der USB-C-Stecker (siehe Abb. 78 l. o.) symmetrisch aufgebaut ist und viele Signale doppelt existieren, wurden häufig zwei Pins miteinander verbunden. Bei den USB data-positive und data-negative Signalen handelt es sich um high-speed Signale. Daher wurden die Traces sehr kurz ausgeführt. Außerdem wurde die Länge beider Leiterbahnen angeglichen, um den Phasenversatz zwischen den differentiellen Signalen gering zu halten.

Das Footprint des USB-zu-UART-ICs (siehe Abb. 78 Mitte-r.) wurde leicht modifiziert. Da es sich um ein SMD-Footprint mit sehr kleinen Pads handelt, die zum Teil komplett unter dem IC verborgen sind, wurde eine Via im Ground-Pad in der Mitte des Footprints hinzugefügt. Diese Via ermöglicht es, mit einem LötKolben von der Rückseite der Platine den gesamten IC zu erhitzen und das Ground-Pad zu verlöten. Dies stellt eine Alternative zum Lötprozess in einem Reflow-Ofen dar.

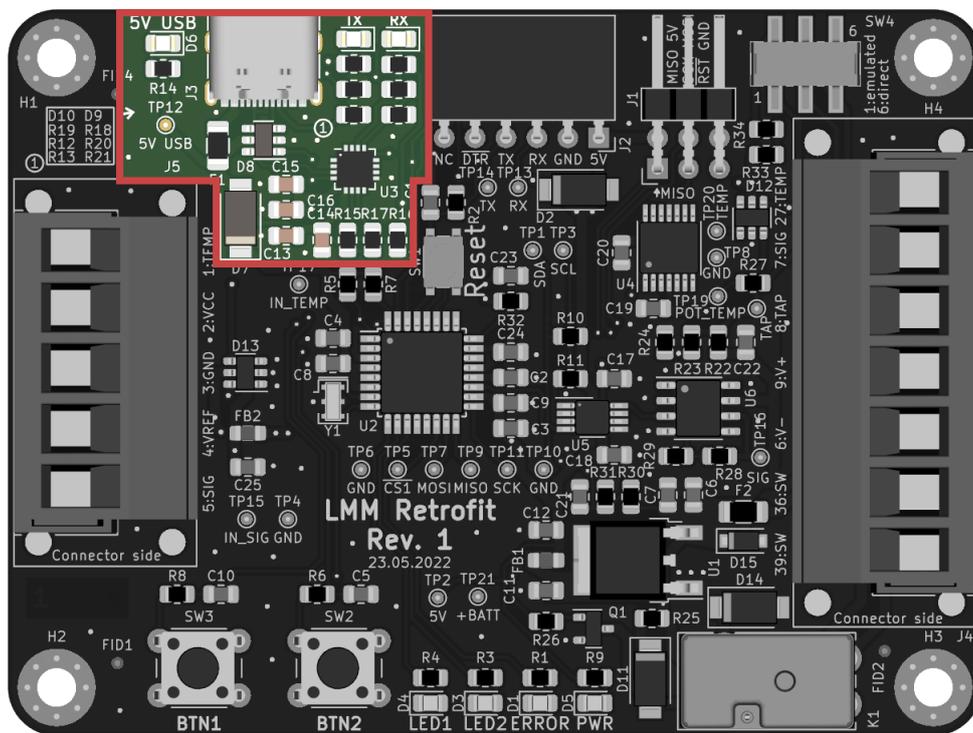


Abbildung 77: USB-zu-UART-Brücke markiert

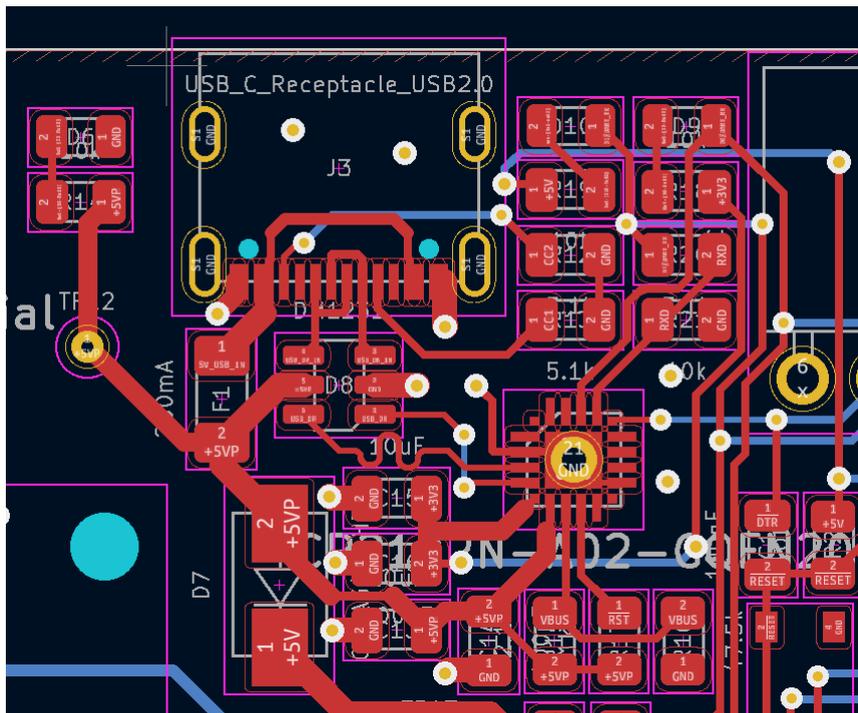


Abbildung 78: Layout der USB-zu-UART-Brücke

3.9 Platinenbestückung

Die Platine wurde beim Dienstleister Aisler bestellt. Die unbestückte Platine ist auf der Abb. 79 zu sehen. Im ersten Schritt wurde mit Hilfe einer Schablone (Stencil) Lötpaste auf alle SMD-Pads aufgebracht (siehe Abb. 80 und Abb. 81). Anschließend wurden alle SMD-Bauteile mit einer Pinzette an der korrekten Position platziert (siehe Abb. 82).

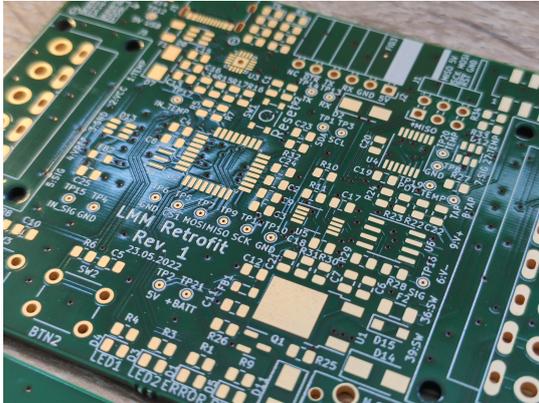


Abbildung 79: Nahaufnahme der unbestückten Platine



Abbildung 80: Schablone zum Aufbringen der Lötpaste

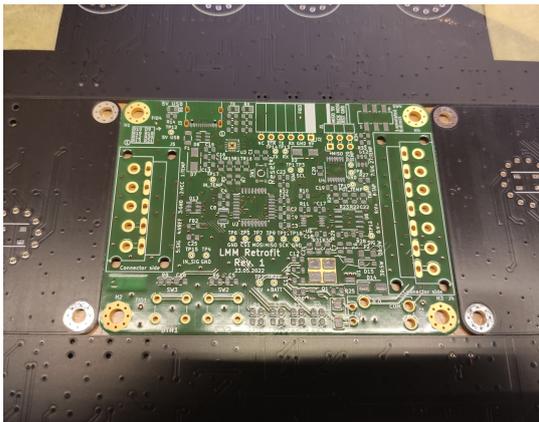


Abbildung 81: Unbestückte Platine in Halterung

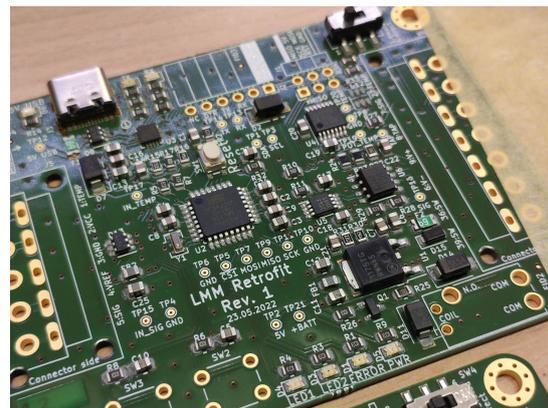


Abbildung 82: Bestückte aber noch nicht verlötete Platine

Nachdem die Bauteile auf der Platine platziert wurden, wurde die Platine in einem Reflow-Ofen erhitzt und die Lötpaste verschmolz (siehe Abb. 83). Im Anschluss wurden diverse Through Hole Technology (THT)-Bauteile von Hand verlötet. Die vollständig bestückte Platine ist auf Abb. 84 dargestellt. Es wurde die gesamte Platine auf Defekte bei Lötstellen untersucht. Zwei Kontakte des USB-C-Steckers waren durch eine Lötbrücke miteinander verbunden. Dieser Fehler wurde mit einem Handlötkolben behoben. Die Abb 85 zeigt eine Nahaufnahme des USB-C-Steckers (l. o.) und des USB-zu-UART-ICs (mittig).



Abbildung 83: Temperaturkurve des Reflow-Ofens

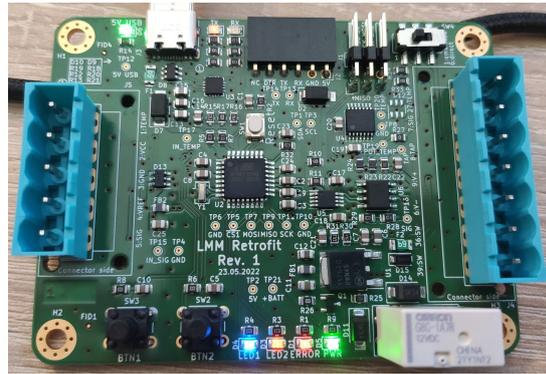


Abbildung 84: Vollständig bestückte Platine

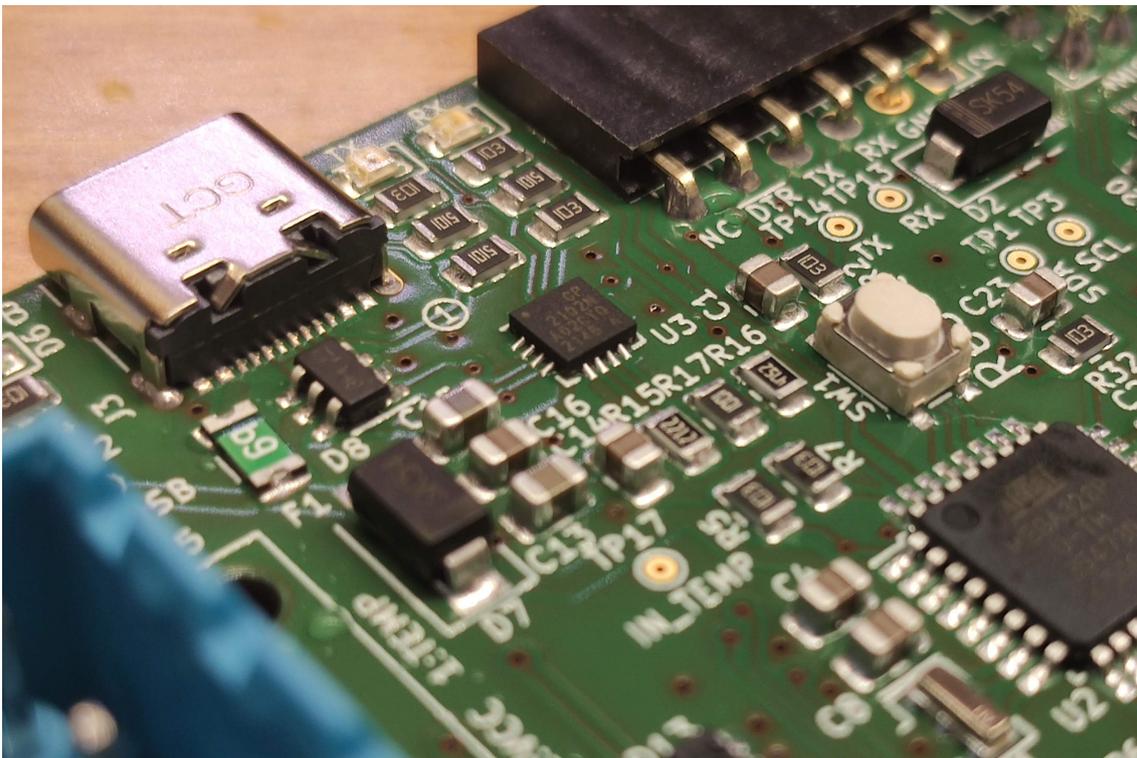


Abbildung 85: Nahaufnahme der vollständig bestückten Platine

3.10 Firmwareentwicklung

Der Programmcode für den Mikrocontroller ist in der Programmiersprache C++ geschrieben.

Es wurden zwei Projekte mit Quellcode für den Mikrocontroller angelegt. Der Abschnitt 3.10.2.1 beschreibt den Code für den Funktionstest der bestückten LMM-Retrofit-Platine.

Der Abschnitt 3.10.2.2 beschreibt den Quellcode für die Wiedergabe der Kennlinie und die weiteren Funktionen, die für den Praxiseinsatz nötig sind.

3.10.1 Dokumentation des Quellcodes

Der Quellcode ist durch Kommentare dokumentiert. Es wurde entschieden, die Sprache Englisch für die Benennung von Methoden, Variablen und die Kommentare zu wählen. Dies ist üblich bei Open-Source-Projekten und ermöglicht es, dass nicht deutsch sprechende Menschen diesen Code ebenfalls verstehen können.

Formale Kommentare, die in Bezug auf die Bachelorarbeit eingebaut wurden, wurden auf deutsch verfasst.

Für die Dokumentation des Mikrocontroller-Sourcecodes wurde die Software Doxygen verwendet. Diese generiert aus entsprechend formatierten Kommentaren, die im Sourcecode geschrieben werden müssen, eine Dokumentation für das gesamte Projekt. Diese Dokumentation kann in HTML generiert werden oder auch in Form eines LaTeX-Dokuments. In diesem Projekt wurde nur eine HTML-Dokumentation erzeugt, die mit jedem Webbrowser geöffnet werden kann (siehe Abb. 86).

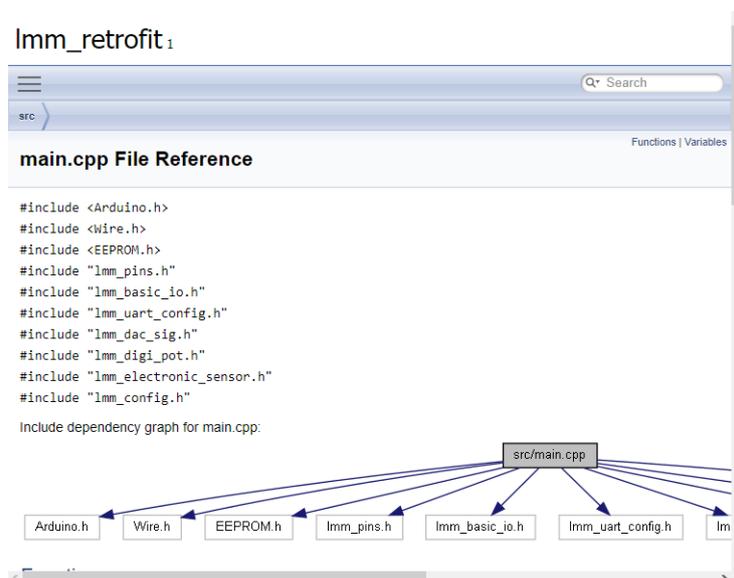


Abbildung 86: Screenshot der durch Doxygen generierten Dokumentation

3.10.2 Firmware des Mikrocontrollers

Der Mikrocontroller wird über das Arduino-Framework programmiert. Dabei wird das PlatformIO IDE-Plugin für Visual Studio Code verwendet (siehe Abb. 87). Diese IDE bietet einige Vorteile gegenüber der Arduino IDE, die direkt von der Firma Arduino angeboten wird.

Ausschlaggebende Kriterien für die Entscheidung für Platform IO waren im Kontext dieser Arbeit:

- Code-Autocomplete
- Rechtschreibprüfung
- Unterstützung zahlreicher Mikrocontroller
- deutlich schnelleres Kompilieren von Code
- bessere Benutzeroberfläche
- simple Verwaltung von Libraries

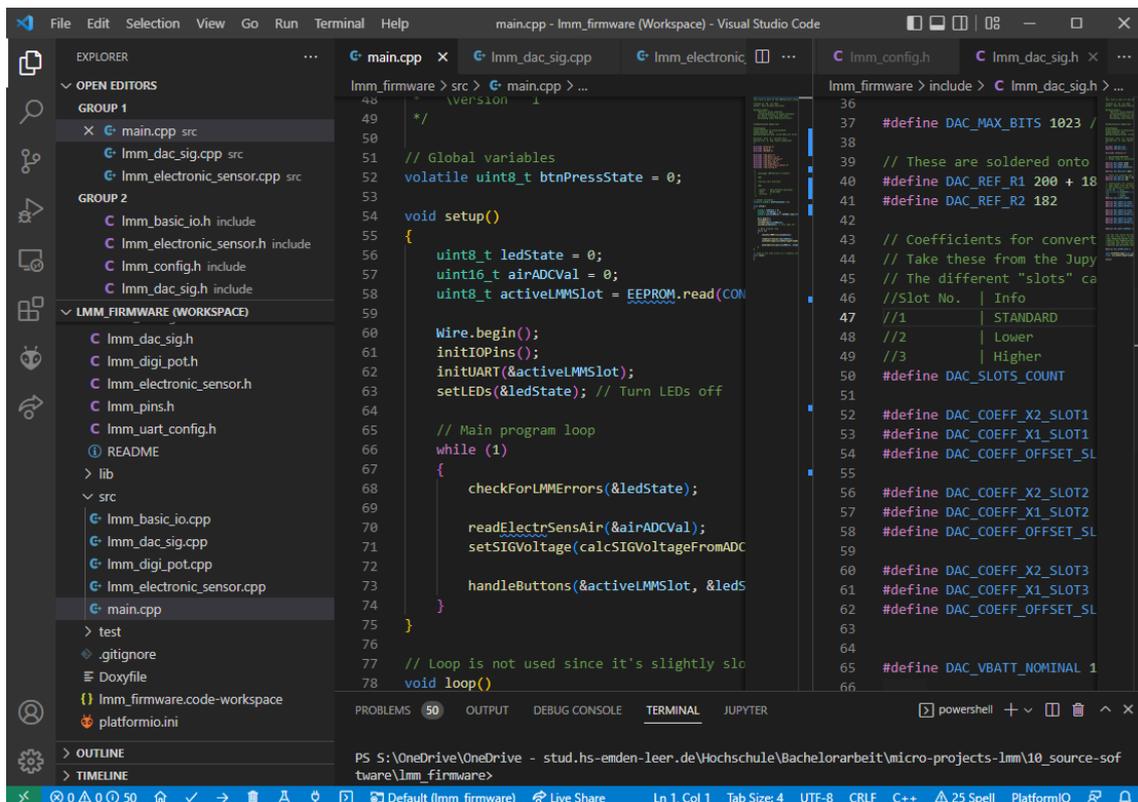


Abbildung 87: Screenshot der Entwicklungsumgebung: Platform IO IDE

3.10.2.1 Entwicklung eines Testprogramms

Zu Beginn wurde ein Testprogramm programmiert, mit dessen Hilfe es möglich ist, die grundsätzliche Funktionalität der bestückten Platine sicherzustellen.

Dieses Programm durchläuft eine Reihe von Tests und gibt dem Nutzer über den UART-Port Anweisungen und Informationen. So muss der Nutzer beispielsweise beide Taster betätigen. Beim Test der Relaisspule und einigen weiteren Überprüfungen muss der Nutzer durch das Drücken des Tasters 1 bestätigen, dass z. B. ein Klicken des Relais zu hören war.

Im Anhang (siehe Abschnitt 6.1) ist dargestellt, welche Ausgaben über den UART-Port versandt werden.

Folgende Überprüfungen werden durchgeführt:

1. Test der drei programmierbaren LEDs
2. Test der beiden Taster
3. Messung der 12 V Versorgungsspannung mittels ADC
4. Ein- und Ausschalten der Relaisspule
5. Scan des I²C-Busses, um sicherzustellen, dass der DAC und das digitale Potentiometer zu erreichen sind
6. Einstellung des digitale Potentiometers auf 25 k Ω
7. Ausgabe von 4 V über den DAC und OPV

3.10.2.2 Hauptprogramm für die Kennlinienwiedergabe

Nach Abschluss der Entwicklung des Testprogramms wurde das Programm für die Kennlinienwiedergabe programmiert. Ein nicht unerheblicher Teil des Quellcodes des Testprogramms konnte wiederverwendet werden, da es Überschneidungen bei der grundlegenden Funktionalität gibt. Ein Beispiel hierfür ist die Methode *initIOPins()*, die in beiden Fällen exakt die selbe Funktion besitzt.

In dem Arduino-Framework gibt es zwei vordefinierte Methoden. Dabei handelt es sich um *setup()* und *loop()*. Beide müssen im Quellcode vorhanden sein, damit dieser kompiliert werden kann. *setup()* wird einmalig ausgeführt und ist für Initialisierungen vorgesehen, während *loop()* die Dauerschleife darstellt. Wenn allerdings eine Dauerschleife in *setup()* mithilfe einer unendlichen *while(1)*-Schleife realisiert wird, so ist diese geringfügig schneller als *loop()*. Daher wurde diese Variante bei der Umsetzung der Kennlinienwiedergabe gewählt.

Auf der Abb. 88 ist dargestellt, welche Methoden von *setup()* und der in *setup()* integrierten Dauerschleife aufgerufen werden.

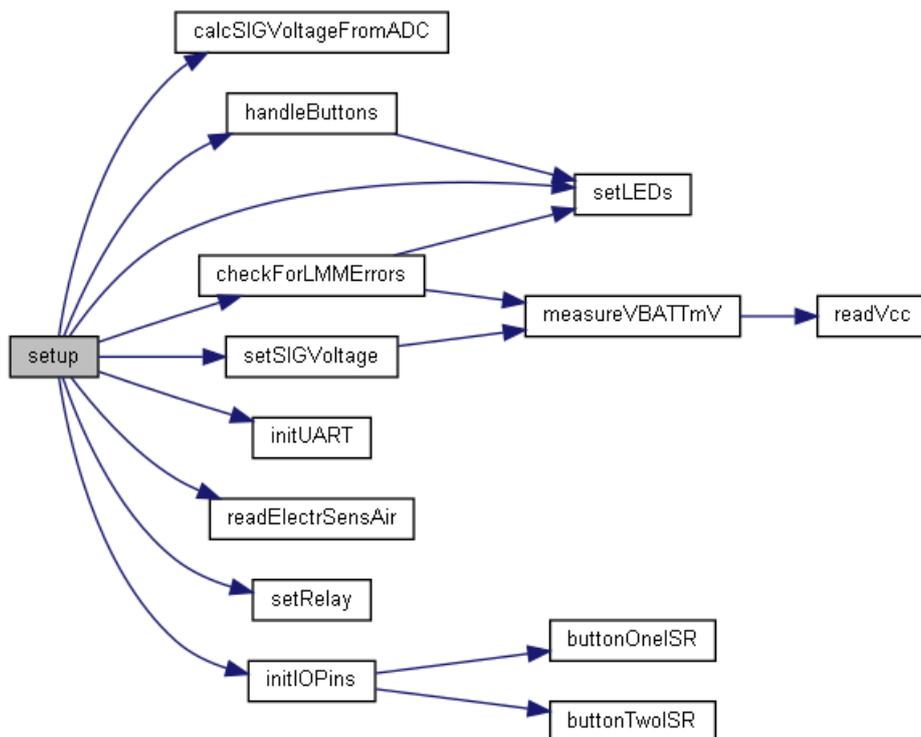


Abbildung 88: Call-Graph der *setup()*-Methode

Im Folgenden werden die wichtigsten Bestandteile des Programms erläutert.

ADC-Messung des el. LMMs

Die Methode zur Messung des Signals, das vom elektronischen LMM ausgegeben wird, verwendet den ADC für die Erfassung (siehe Auflistung 2). Über die Konstante `CONFIG_AIR_SENS_AVG_COUNT` kann vor dem Kompilieren des Codes festgelegt werden, wie oft eine Messung vorgenommen und daraus der Mittelwert gebildet werden soll.

```
1 void readElectrSensAir(uint16_t *airADCVal)
2 {
3     *airADCVal = 0;
4     for (uint16_t i = 0; i < CONFIG_AIR_SENS_AVG_COUNT; i++)
5     {
6         *airADCVal += analogRead(SIG_SENSE_PIN);
7     }
8     *airADCVal = *airADCVal / CONFIG_AIR_SENS_AVG_COUNT;
9 }
```

Quellcode 2: Messung des el. LMMs

Watchdog-Timer

Im verwendeten ATmega328P-Mikrocontroller ist ein Watchdog-Timer in Hardware integriert. Auf diesen wird über eine Header-Datei, die Teil der Hardware Abstraction Layer (HAL) ist, zugegriffen. Dieser Watchdog ist so konfiguriert, dass ein Reset durchgeführt wird, sofern dieser nicht innerhalb von 15ms zurückgesetzt wird. Dieses ist das kleinste konfigurierbare Zeitintervall. Messtechnisch wurde bestimmt, dass ein Durchlauf der Dauerschleife ca. 6.4 ms in Anspruch nimmt (siehe Abschnitt 4.1.2). In der Dauerschleife, in der auch die Live-Berechnungen der Kennlinie stattfinden, wird der Timer regelmäßig zurückgesetzt.

Sollte dies aus irgendeinem Grund nicht passieren, so ist sichergestellt, dass der Mikrocontroller neu gestartet wird und im Idealfall wieder seine Aufgabe erfüllen kann.

```
1 #include <avr/wdt.h>
2 // other code ...
3
4 // Initializer (runs once)
5 wdt_enable(WDTO_15MS); // Enable watchdog timer to trip after 15ms
6 // other code ...
7
8 // Continuous loop
9 while (1) {
10     wdt_reset(); // Reset watchdog timer
11     // other code ...
12 }
```

Quellcode 3: Watchdog-Timer

Berechnung der Ausgangsspannung basierend auf der Messung des el. LMMs

Das Code-Segment in Auflistung 4 zeigt, wie die auszugebende Ausgangsspannung berechnet wird. Grundlage für die Berechnung ist das Signal des mit dem ADC gemessenen elektronischen LMMs (siehe Auflistung 2).

Zunächst wird ermittelt, ob das Signal des elektronischen LMMs im dem Bereich liegt, der einem Luftstrom entspricht, ab dem davon ausgegangen werden kann, dass der Motor läuft. Falls dies nicht der Fall ist, so wird eine zuvor festgelegte Spannung ausgegeben. Diese Spannung gleicht exakt der, die von mechanischen LMM im Ruhezustand ausgegeben wird. Über die Kennlinie lässt sich diese Spannung nicht berechnen, da diese im niedrigen Durchflussbereich eine zu große Abweichung besitzt. Daher muss ab einem gewissen Schwellwert eine Kompensation vorgenommen werden, die nicht auf der Kennliniengleichung basiert.

Während der Softwareentwicklung wurden zahlreiche Tests durchgeführt. Auf der Abb. 89 ist dargestellt, wie sich das Ausgangssignal ohne die Kompensation im Ruhezustand (kein Luftstrom) verhält. Es fällt eine deutliche Abweichung zwischen den Signalen auf. Analog hierzu zeigt auch die Abb. 90 diese Abweichung vor dem Start und nach dem Stopp des Luftstroms. Die Abb. 91 zeigt die Signale nach einer rudimentären Implementation der Kompensation ohne Hysterese. Die Antwort des Systems ist aufgrund des kurzzeitigen Sprungs nach Abschalten des Luftstroms nicht optimal. Auf Abb. 92 ist dargestellt, wie sich das System mit korrekt eingestellter Hysterese verhält.

Außerdem wurde eine Möglichkeit implementiert, um über die beiden auf der LMM-Retrofit-Platine vorhandenen Taster die Kennlinie nach oben und unten zu verschieben. Dieses Feature dient dazu, den Luft-Bypass, der im mech. LMM existiert, nachzubilden. Zu diesem Zweck sind drei „Slots“ vorgesehen. Jedem Slot ist ein Offset zugeordnet, der zu der Verschiebung der Kennlinie führt. Zwischen den Slots kann durch ein Drücken der Taster gewechselt werden. Der aktive Slot wird im integrierten Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) gespeichert und beim jedem Start der Firmware geladen. Die LED1 blinkt bei Änderung des Slots entsprechend der Slot Nummer. Die Abb. 93 zeigt die beiden Ausgangssignale bei Änderung des Offsets mittels der Taster.

Die Ausgabe der Spannung mittels DAC erfolgt über eine separate Methode, die im Anschluss behandelt wird.

Erläuterung der Oszilloskopaufnahmen:

- Kanal 1 (gelb): Ausgangssignal des LMM-Retrofits (Nachbildung des mechanischen LMMs)
- Kanal 3 (violett): Ausgangssignal des mechanischen LMMs

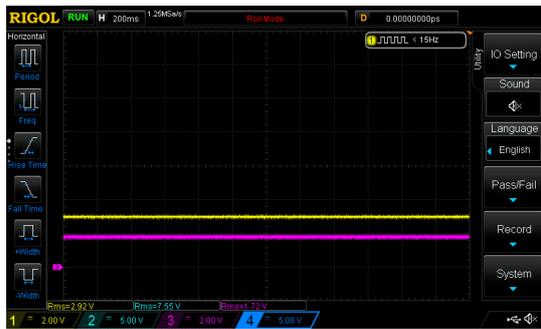


Abbildung 89: Ruhezustand, ohne Kompensation

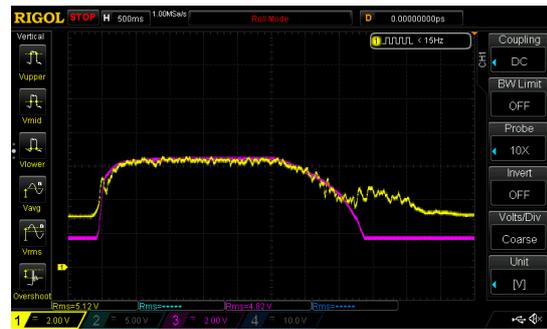


Abbildung 90: Ausschaltmoment, ohne Kompensation

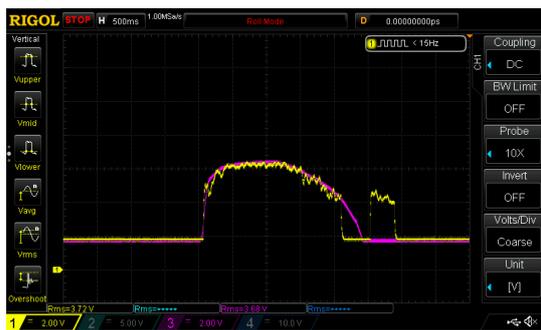


Abbildung 91: Ausschaltmoment, mit Kompensation aber ohne Hysterese

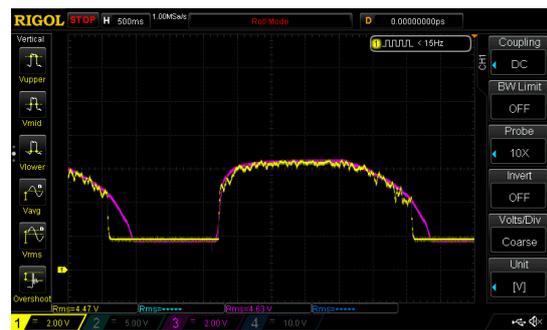


Abbildung 92: Ausschaltmoment, mit Kompensation und aktiver Hysterese

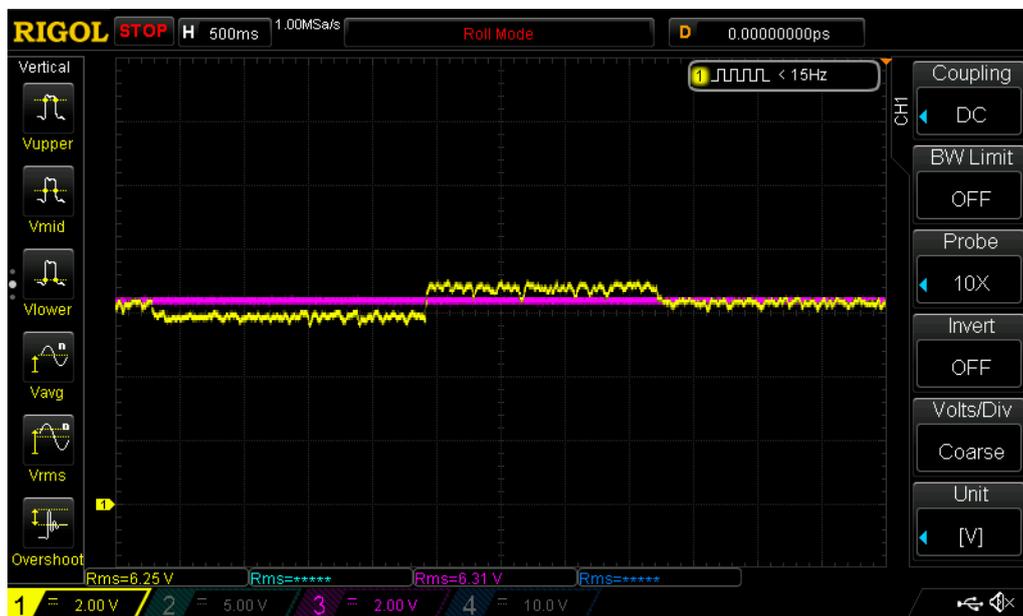


Abbildung 93: Offsets bei der Kennlinienwiedergabe

```

1 float calcSIGVoltageFromADC(uint16_t *airADCVal, uint8_t *
  activeLMMSlot) {
2   float currSIGVoltage = 0;
3   static float SIGVoltage = 0;
4   static uint8_t dacOutputState = 1;
5
6   // Hysteresis for the initial start of the vehicle and when the
  engine gets turned off
7   if (*airADCVal < (DAC_THRESH_NO_OUTPUT - DAC_HYSTERESIS_NO_OUTPUT
  ) && dacOutputState) {
8     dacOutputState = 0;
9   }
10  else if (*airADCVal > (DAC_THRESH_NO_OUTPUT +
  DAC_HYSTERESIS_NO_OUTPUT) && !dacOutputState) {
11    dacOutputState = 1;
12  }
13
14  // Calculate the output voltage based on which slot (for air-
  bypass compensation) is selected
15  if (dacOutputState) {
16    switch (*activeLMMSlot) {
17      case 0:
18        currSIGVoltage = (DAC_COEFF_X2_SLOT1 * (float)*airADCVal * (
  float)*airADCVal) + (DAC_COEFF_X1_SLOT1 * (float)*airADCVal) +
  DAC_COEFF_OFFSET_SLOT1;
19        break;
20      case 1:
21        currSIGVoltage = (DAC_COEFF_X2_SLOT2 * (float)*airADCVal * (
  float)*airADCVal) + (DAC_COEFF_X1_SLOT2 * (float)*airADCVal) +
  DAC_COEFF_OFFSET_SLOT2;
22        break;
23      case 2:
24        currSIGVoltage = (DAC_COEFF_X2_SLOT3 * (float)*airADCVal * (
  float)*airADCVal) + (DAC_COEFF_X1_SLOT3 * (float)*airADCVal) +
  DAC_COEFF_OFFSET_SLOT3;
25        break;
26
27      default:
28        currSIGVoltage = (DAC_COEFF_X2_SLOT1 * (float)*airADCVal * (
  float)*airADCVal) + (DAC_COEFF_X1_SLOT1 * (float)*airADCVal) +
  DAC_COEFF_OFFSET_SLOT1;
29        break;
30    }
31  }
32  else {
33    currSIGVoltage = DAC_NO_OUTPUT_LEVEL;
34  }
35
36  // Simple moving average
37  SIGVoltage = SIGVoltage * (1 - DAC_MOVING_AVERAGE_GAIN) +
  currSIGVoltage * DAC_MOVING_AVERAGE_GAIN;
38
39  return SIGVoltage;
40 }

```

Quellcode 4: Messung des elektronischen LMMs

Ausgabe einer Spannung über den DAC

Die gewünschte Ausgangsspannung wird an die Methode `setSIGVoltage()` (siehe Auflistung 5) übergeben. Aus dieser Zahl berechnet die Methode das Bitmuster, das an den DAC-IC über den I²C-Bus gesendet wird. Es werden zwei Byte über den Bus übertragen, weil der DAC eine Auflösung von 10 Bit besitzt. Die genauen Informationen bezüglich der Bitpositionen (siehe Abb. 94) und der I²C-Adresse wurden dem Datenblatt entnommen (vgl. [11], S. 19 - 20). Die auf der Abb. 94 rot markierten Bits sind Null, während die grün markierten Bits die DAC-Einstellung beinhalten.

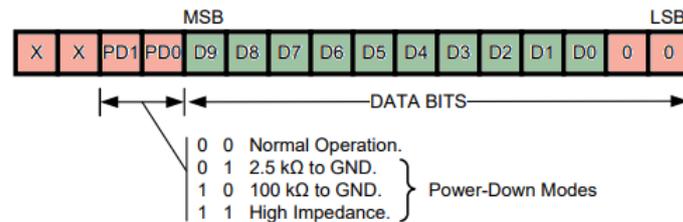


Abbildung 94: Bitmuster des DAC-Konfigurationsregisters ([11], S. 20)

Die Berechnung berücksichtigt eine Reihe von Variablen, die zum Teil über Definitionen in einer Header-Datei angepasst werden können.

- Auflösung des DACs
- Teilerwiderstände der DAC-Referenzspannung
- Verstärkung des OPVs nach dem DAC
- Aktuelle Versorgungsspannung

Die aktuelle Versorgungsspannung des LMM-Retrofit wird gemessen, um den Ausgang des DACs auf diese zu beziehen. Dies ist nötig, da die Kennlinie und somit auch ihre Koeffizienten für eine Versorgungsspannung von 12 V bestimmt wurden. Im Praxiseinsatz schwankt die Spannung und somit kann nicht von einer konstanten Spannung von 12 V ausgegangen werden.

```
1 void setSIGVoltage(float outputVoltage) {
2     // Calculate code for the DAC
3     float vBATT = measureVBATTmV() / 1000.0;
4     uint16_t code = DAC_MAX_BITS * (outputVoltage * ((DAC_REF_R1 +
5         DAC_REF_R2) / (vBATT * DAC_REF_R2 * DAC_OPAMP_GAIN))) * (vBATT /
6         DAC_VBATT_NOMINAL);
7
8     // https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac101c081.pdf Page 19
9     uint8_t upperByte = (code >> 6);
10    uint8_t lowerByte = (code << 2);
11
12    Wire.beginTransmission(DAC_ADDR1);
13    Wire.write(upperByte);
14    Wire.write(lowerByte);
15    Wire.endTransmission();
16 }
```

Quellcode 5: DAC-Ausgangsspannung

Messung der Versorgungsspannung des Mikrocontrollers

Um eine präzise ADC-Messung durchführen zu können, ist es nötig, dass die Referenzspannung des ADCs stabil und bekannt ist. Da auf der Platine ein Linearregler zum Einsatz kommt und diese Spannung zugleich als Referenz für den ADC verwendet wird, ist diese Präzision nicht automatisch gegeben. Die Ausgangsspannung des Linearregler ist bauteilabhängig und wird außerdem durch die Last beeinflusst. Der ATmega328P-Mikrocontroller verfügt über eine integrierte 1,1 V Referenzspannung ([2], S. 205). Da mit dem ADC aber Spannungen von bis zu 5 V gemessen werden sollen, kann diese nicht als Referenz für die ADC-Messungen verwendet werden.

Der folgende Code (siehe Auflistung 6) verwendet die 1,1 V Referenzspannung, um über diese zu ermitteln, welchen Wert die Versorgungsspannung hat. Dieser Code wurde aus der Quelle [20] bezogen. Basierend auf dem messtechnisch bestimmten Wert der Versorgungsspannung können eine Reihe von genauen ADC-Messungen vorgenommen werden.

```
1 long readVcc()
2 {
3     long result;
4     // Read 1.1V reference against AVcc
5     ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
6     delay(2); // Wait for Vref to settle
7     ADCSRA |= _BV(ADSC); // Convert
8     while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC))
9         ;
10    result = ADCL;
11    result |= ADCH << 8;
12    result = 1126400L / result; // Back-calculate AVcc in mV
13    return result;
14 }
```

Quellcode 6: Messung der Versorgungsspannung des Mikrocontrollers

Weitere Programmkomponenten

Zu den weiteren Programmkomponenten gehören:

- diverse Initialisierungsfunktionen für die Initialisierung der Peripherie.
- Methoden, die die Ansteuerung diverser Hardwarebaugruppen (LEDs, Relais und Taster) vereinfachen. Die Taster lösen einen Hardware-Interrupt aus. Über eine globale Variable kann das Hauptprogramm einen Tastendruck erkennen. Das Relais wird auf der Basis des aktuell gemessenen Signals des el. LMMs angesteuert.
- Überprüfungen, um sicherzustellen, dass die Betriebsbedingungen der LMM-Retrofit-Platine eingehalten werden. Es ist eine Überprüfung der vom Fahrzeug kommenden Versorgungsspannung implementiert. Sofern die Überprüfung einen Fehler feststellt, beginnt die rote ERROR-LED zu blinken. Das Hauptprogramm wird nach der Feststellung eines Fehlers normal weiter ausgeführt. Da das LMM-Retrofit als isoliertes System keine Möglichkeit hat nach außen zu kommunizieren, ist es nicht sinnvoll, beispielsweise die Kennlinienwiedergabe zu beenden. Der Fahrer des Fahrzeugs hätte keine Möglichkeit den Fehler zu erkennen und es könnte zu Schäden am Fahrzeug kommen, wenn das LMM-Retrofit das nötige Signal nicht ausgibt.

3.11 Gehäusedesign

Das 3D-druckbare Gehäuse wurde mit der Computer Aided Design (CAD)-Software Fusion 360 der Firma Autodesk erstellt (siehe Abb. 95).

Als Basis für das Gehäuse diente das aus KiCAD exportierte 3D-Modell der Platine inklusive der elektronischen Komponenten. Im Design wurden veränderbare Parameter verwendete (siehe Abb. 96). So sind Änderungen an den diversen Abmessungen leicht vorzunehmen.

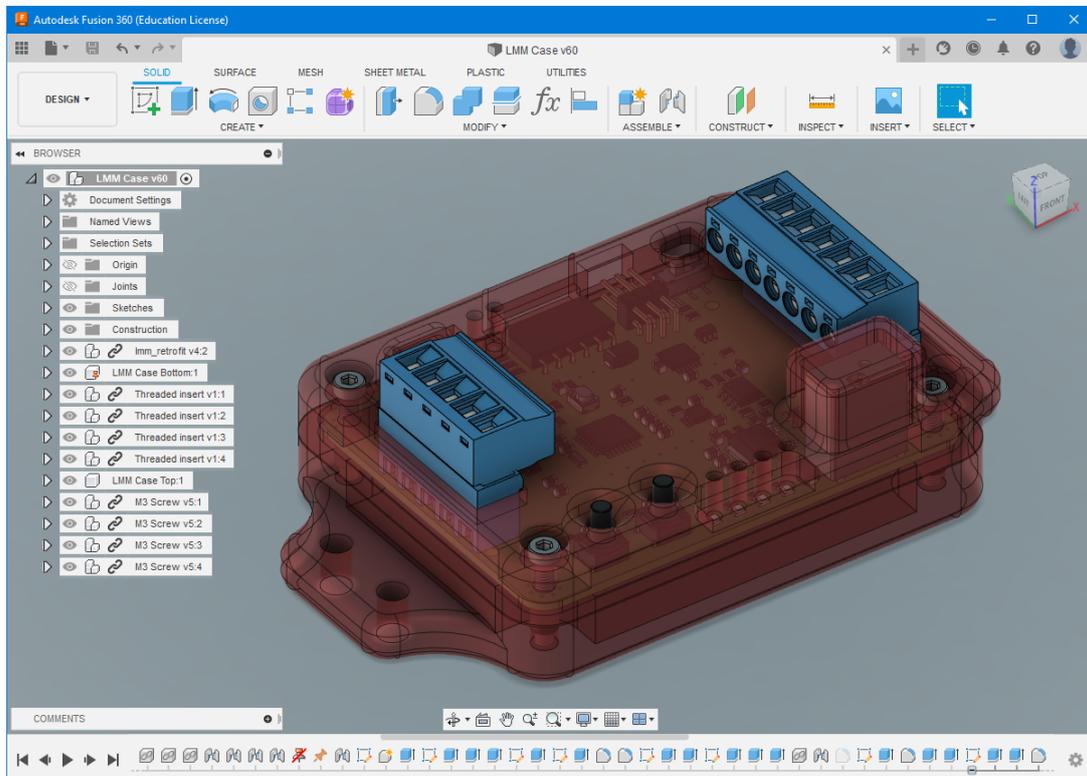


Abbildung 95: Interface der CAD-Software

Parameter	Name	Unit	Expression	Value	Comments
Favorites					
User Parameters +					
☆ User Parameter	wall	mm	3 mm	3.00	
☆ User Parameter	clearance_to_walls	mm	0.8 mm	0.80	
☆ User Parameter	insert_h	mm	8 mm	8.00	
☆ User Parameter	insert_d	mm	4.3 mm	4.30	
☆ User Parameter	m3_hole_d	mm	3.6 mm	3.60	
☆ User Parameter	m3_screw_head_d	mm	6 mm	6.00	
☆ User Parameter	m3_head_h	mm	2.5 mm	2.50	
☆ User Parameter	m3_washer_d	mm	7.5 mm	7.50	
☆ User Parameter	pcb_x	mm	80 mm	80.00	
☆ User Parameter	pcb_y	mm	60 mm	60.00	
☆ User Parameter	pcb_height	mm	1.6 mm	1.60	
☆ User Parameter	printing_tolerance	mm	0.4 mm	0.40	
☆ User Parameter	case_bottom_h	mm	wall + insert_h + 1 mm	12.00	
☆ User Parameter	insert_surround_offset	mm	4 mm	4.00	
☆ User Parameter	center_pcb_support_pillar_d	mm	8 mm	8.00	
☆ User Parameter	center_pcb_support_pillar_...	mm	0.1 mm	0.10	small amount of extra height, s...
☆ User Parameter	case_top_h_RELAY	mm	22 mm	22.00	
☆ User Parameter	case_top_h_REGULAR	mm	pcb_height + 6 mm	7.60	
☆ User Parameter	case_led_hole_diam	mm	2.5 mm	2.50	

Abbildung 96: Parameter des 3D-Designs

Die Abb. 97 zeigt ein Render des Gehäusedesigns. Auf der Abb. 98 ist das 3D-gedruckte Gehäuse ohne die seitlichen Befestigungslöcher abgebildet. Für die LEDs, den Schalter für die NTC-Auswahl und die Taster sind Löcher in dem Deckel des Gehäuses vorhanden. Die Stecker sind ebenfalls von außen zugänglich. Die Debug-Schnittstellen, wie USB-C Buchse etc. können durch entsprechende Aussparungen in der hinteren Seitenwand verwendet werden. Das Relais, welches das höchste Bauteil ist, wird auch vom Gehäuse eingeschlossen. Der Deckel wird mit vier Schrauben auf die mit Gewindeeinsätzen versehene Unterseite aufgeschraubt.

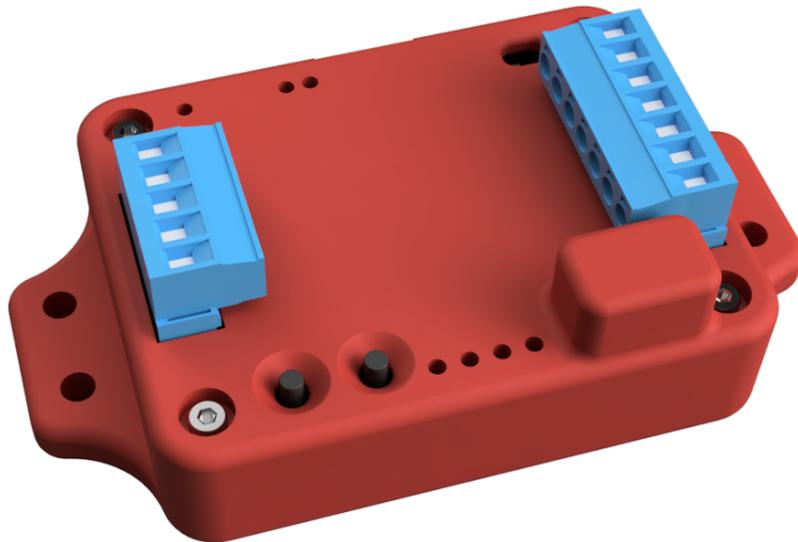


Abbildung 97: Render des Gehäusedesigns

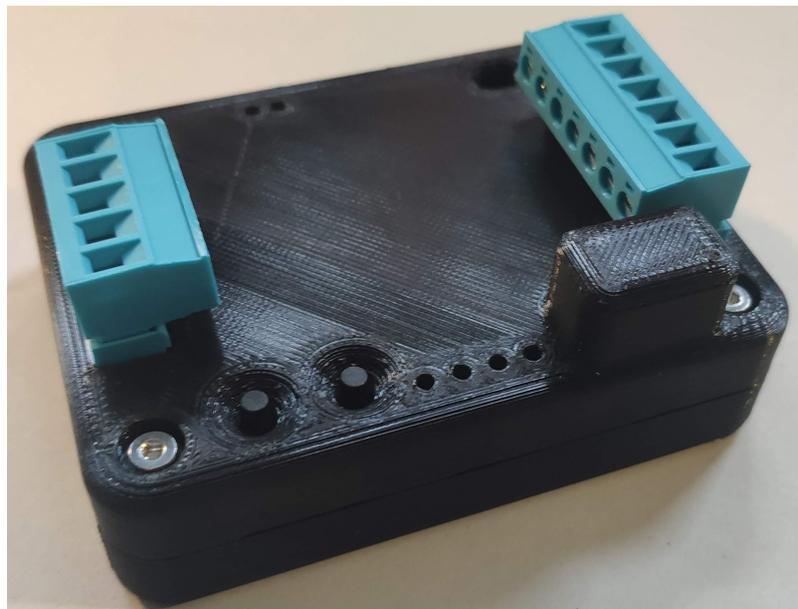


Abbildung 98: 3D-gedrucktes Gehäuse

4 Bewertung der Ergebnisse

Dieses Kapitel dient der Bewertung des realisierten LMM-Retrofit-Systems.

Es wird die Wiedergabe der Kennlinie anhand von Messdaten betrachtet (siehe Abschnitt 4.1.1). Die Laufzeit der Kennlinienwiedergabe der entwickelten Firmware wird in Abschnitt 4.1.2 evaluiert.

Außerdem werden im Abschnitt 4.2 nötige Verbesserungen an der entwickelte Platine erläutert.

4.1 Bewertung der Firmware

Die Firmware wird in Bezug auf die Kennlinienwiedergabe und deren Laufzeit evaluiert.

4.1.1 Kennlinienwiedergabe

Auf Abb. 99 ist zu sehen, dass die vom LMM-Retrofit ausgegebene Signalspannung unabhängig von der Versorgungsspannung zu der Ausgangsspannung des mechanischen LMMs passt.

Die Abb. 100 zeigt das Verhalten beider Signale bei einer Modulation des Luftstroms. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Nachbildung dem Signal des mechanischen LMMs gleicht. Es ist zu erkennen, dass das vom LMM-Retrofit ausgegebene Signal ein Rauschen vorweist. Auf der Abb. 101 sind die Ausgangssignale des el. LMMs und des mech. LMMs dargestellt. Aus diesen Messungen geht hervor, dass das Signal des el. LMMs ein erhebliches Rauschen vorweist. Dieses Signal wird vom LMM-Retrofit-System abgetastet und auf dieser Basis wird ein passender Ausgang bestimmt. Das Signal wird vor der Abtastung über einen Tiefpass-Filter, der in Hardware realisiert ist, gefiltert. Wenn die Zeitkonstante weiter erhöht werden würde, so würde die Sprungantwort nicht mehr zufriedenstellend sein. Daher wurde bei der aktuellen Umsetzung ein Kompromiss gefunden zwischen einer adäquaten Sprungantwort mit vertretbarem Rauschen.

Abschließend ist festzustellen, dass die originalgetreue Nachbildung zufriedenstellend funktioniert (siehe Abb. 102).

Erläuterung der Oszilloskopaufnahmen:

- Kanal 1 (gelb): Ausgangssignal des LMM-Retrofits (Nachbildung des mechanischen LMMs)
- Kanal 3 (violett): Ausgangssignal des mechanischen LMMs

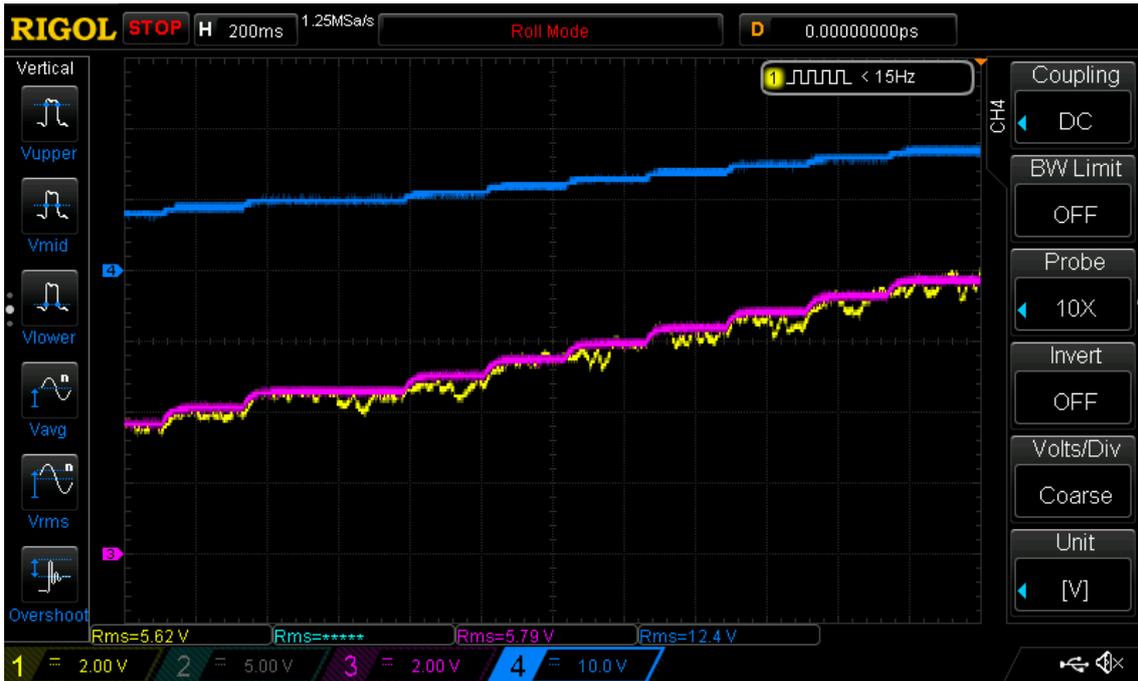


Abbildung 99: Änderung der Versorgungsspannung (Kanal 4 (blau))

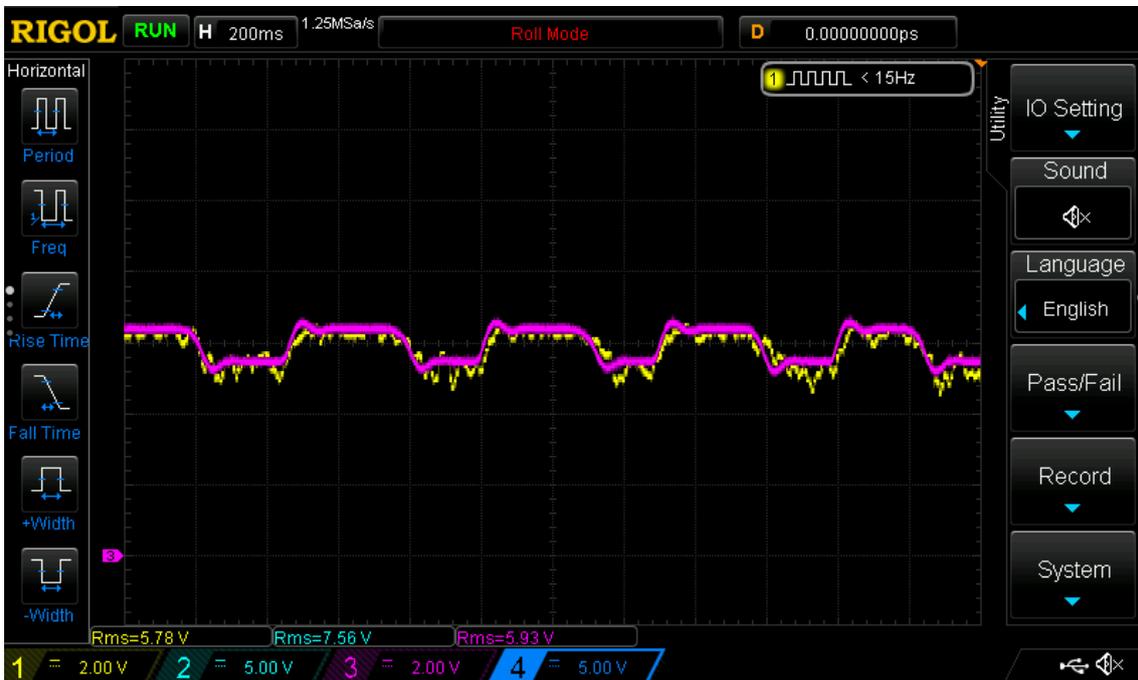


Abbildung 100: Modulation des Luftstroms bei konstanter Versorgungsspannung



Abbildung 101: Ausgangssignale des mech. und el. LMMs (Kanal 1: Ausgang des el. LMMs)

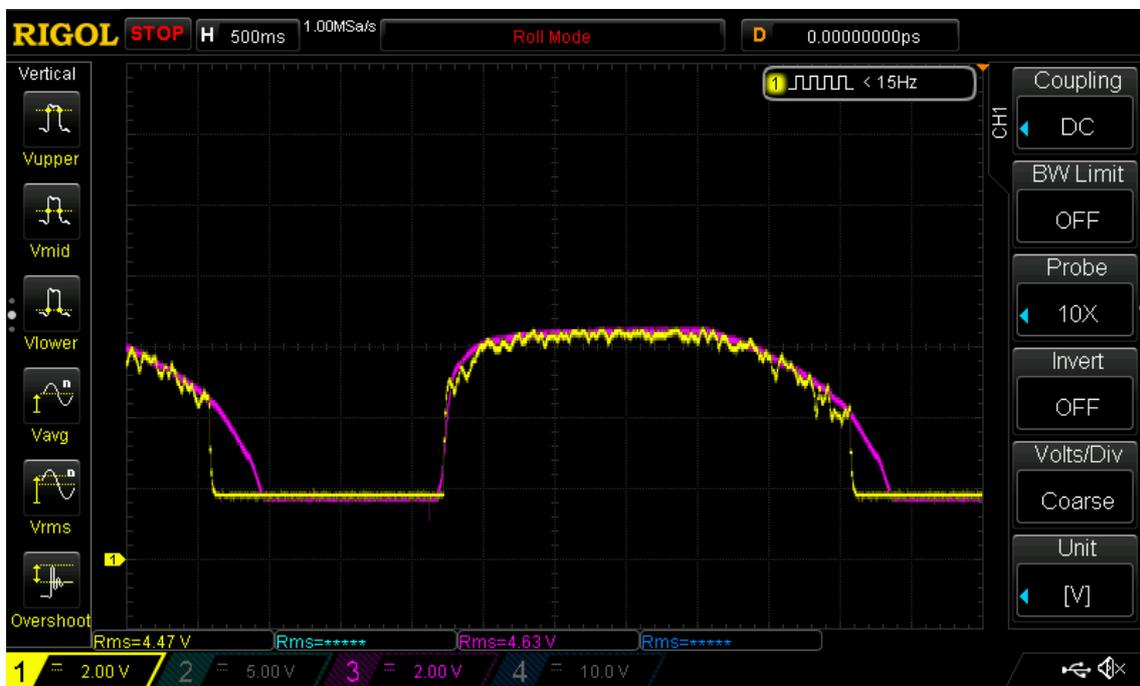


Abbildung 102: Originalgetreue Wiedergabe der Kennlinie

4.1.2 Firmware-Laufzeitmessung

Die Laufzeitmessung der Firmware ermöglicht es, zu bewerten, ob der Mikrocontroller in der Lage ist, seine Aufgabe schnell genug zu erfüllen.

Zu diesem Zweck wurde der Quellcode 7 programmiert. Dieser verwendet eine Zählvariable, die mit jedem Aufruf der Methoden für die Kennlinienberechnung und -ausgabe inkrementiert wird. Nach 1000 Durchläufen invertiert das Programm den Wert des Input / Output (IO)-Pins mit der Nummer 13. Dieser Pin ist über einen Testpunkt auf der Platine zugänglich. Mit einem Oszilloskop wird die Zeit ermittelt (siehe Abb. 103), in der der Pin seinen Zustand nicht ändert. Diese Zeit stellt die Laufzeit, geteilt durch 1000, dar.

Die Messung zeigt, dass 1000 Durchläufe ca. 6.4 s benötigen.

Aus dieser Zeit lässt sich errechnen, dass einen Durchlauf des Programms ca. 6.4 ms in Anspruch nimmt (siehe Gl. 5).

$$T_{run} = \frac{T_n}{n} = \frac{6,4 \text{ s}}{1000} = 6,4 \text{ ms} \quad (5)$$

Daraus resultiert eine Frequenz von ca. 160 Hz (siehe Gl. 6).

$$f_{run} = \frac{1}{T_{run}} = 156,25 \text{ Hz} \quad (6)$$

Diese Zeit ließe sich durch weitere Optimierungen in der Firmware des Mikrocontrollers reduzieren. Wenn beispielsweise ein sog. „Lookup-Table“ verwendet werden würde, anstelle der Fließkomma-Berechnung mittels Koeffizienten, so würde ein sehr rechen- und somit zeitintensiver Bestandteil entfallen. Es ist denkbar, dass sich die Performance auf diese Weise maßgeblich steigern ließe. Wie die Messergebnisse aus dem Abschnitt 4.1.1 zeigen, ist dies nicht nötig, um die Kennlinie originalgetreu nachzubilden.

```
1 volatile unsigned int runtimeCounter = 0;
2 // other code ...
3
4 while (1) {
5
6     runtimeCounter++;
7     // other code ...
8
9     if (runtimeCounter == 1000)
10    {
11        runtimeCounter = 0;
12        // Toggle Pin D13
13        digitalWrite(13, !digitalRead(13));
14    }
15
16 }
```

Quellcode 7: Firmware-Laufzeitmessung

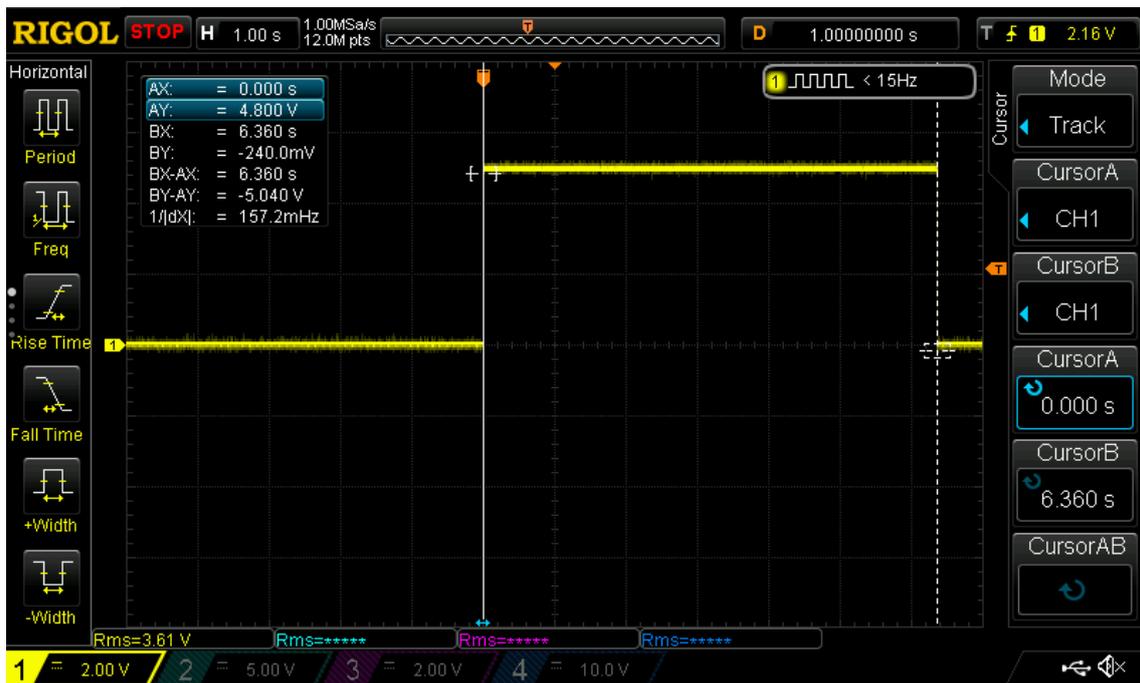


Abbildung 103: Laufzeitmessung für 1000 Durchläufe

4.2 Bewertung der Platine

Das Platinendesign des LMM-Retrofit wird im Abschnitt 4.2.1 in Bezug auf die Robustheit gegenüber Schäden und Ausfall durch elektrische Störursachen bewertet. Außerdem wird in Abschnitt 4.2.2 diskutiert, welche Änderungen nötig sind, damit das LMM-Retrofit die Temperatur wie vorgesehen messen und somit den NTC nachbilden kann.

4.2.1 Elektrische Robustheit

Das LMM-Retrofit-System kommt in einem PKW zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine Umgebung, in der zahlreiche Vorkehrungen getroffen werden sollten, um Schäden an der Elektronik zu vermeiden. Auf die Design-Entscheidungen in diesem Kontext wurde in Abschnitt 3.6 eingegangen.

Dennoch sind nach dem Zusammenbau der Platine und den ersten Funktionstest einige Probleme am Design ermittelt worden.

Diese werden im Folgenden aufgelistet und kurz erläutert.

- Das ESD-Diodenarray zum Schutz der Datenpins ist falsch bemessen. Die Durchbruchspannung ist zu niedrig dimensioniert.
- Die Referenzspannung des DAC wird über einen Spannungsteiler gebildet. Wenn die Bordnetzspannung des PKW, welche die Platine speist, unerwartet hoch sein sollte, so ist bei der aktuellen Revision kein Schutzmechanismus vorhanden. Das Problem könnte beispielsweise mit einer Zener-Diode gelöst werden.
- Analog zum soeben erläuterten Problem, kann dies auch mit dem Spannungsteiler zur Messung der Versorgungsspannung auftreten. Hier ist zwar schon ein Tiefpass mittels RC-Schaltung realisiert, der kurze Spannungsspitzen unterdrückt. Es sollte dennoch ein weiterer Schutzmechanismus implementiert werden, um auch vor längeren Überspannungs-Events zu schützen.
- Die aktuelle Revision ist nicht gegen Verpolung der Eingangsspannung abgesichert. Ein Schutz ließe sich mit einer Schottky-Diode oder einem P-Kanal-Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) realisieren.
- Der Ausgang des OPVs ist direkt auf den Stecker geführt. Hier sollte ein Serienwiderstand verbaut werden, um den Strom im Kurzschlussfall oder einem ähnlichen Szenario zu begrenzen.

4.2.2 Temperaturmessung mit NTC

Die Schaltung zur Messung des NTC-Widerstands im el. LMM ist fehlerhaft implementiert. Es existiert eine direkte elektrische Verbindung zwischen dem Steckkontakt, an dem der NTC-Widerstand angeschlossen ist und dem Input-Pin des Mikrocontrollers. Wenn der Schalter (siehe Abschnitt 3.7.4.1) auf die Position „direkte Verbindung“ gestellt wird, so wird der NTC-Widerstand des el. LMMs direkt mit dem Motorsteuergerät verbunden. Da das Steuergerät bis zu 9 V anlegt, um den Widerstand zu messen, wird der Input-Pin des Mikrocontrollers geschädigt, da dieser ebenfalls direkt verbunden ist.

Dieser Teil der Schaltung muss überarbeitet werden, sofern eine Kennlinienwiedergabe mittels Digitalpotentiometer gewünscht ist.

Eine temporäre Abhilfe ist, die Leiterbahn, die zum Pin des Mikrocontrollers führt, zu durchtrennen. Wenn dies durchgeführt wird, kann dieser die Temperatur nicht messen, der Eingangspin kann aber auch nicht geschädigt werden. Eine Kennlinienwiedergabe mittels Digitalpotentiometer ist nach dieser Modifikation nicht möglich. Der NTC-Thermistor des el. LMM muss nach der Modifikation über den Schalter SW4 direkt mit dem Motorsteuergerät verbunden werden, damit das Motorsteuergerät anhand des NTCs im el. LMM die Temperatur bestimmen kann.

Im Abschnitt 3.3.3.2 werden die Messdaten bezüglich der NTC-Thermistoren evaluiert. Die Auswertung ergibt, dass eine Nachbildung im Falle der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten LMM nicht nötig ist. Insofern beeinträchtigt dieser Fehler die Einsatzfähigkeit des LMM-Retrofit-Systems nur geringfügig.

5 Schlusswort und Ausblick

Aufgrund des zeitlichen Rahmens der Arbeit wurden keine Messungen an einem realen PKW vorgenommen. Diese Messungen zur weiteren Verifikation der Funktion des LMM-Retrofit sind daher Gegenstand weiterführender Arbeiten.

Darüber hinaus bedarf die Kennlinienwiedergabe einer Verbesserung in Bezug auf das starke Rauschen, das vom elektronischen LMM ausgeht. Hier weist die aktuelle Realisierung mittels Kennliniengleichung noch ein suboptimales Verhalten auf. Der Abschnitt 4.1.1 geht auf dieses Problem genauer ein.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Platine benötigt kleinere Anpassungen in Bezug auf die elektrische Robustheit, insbesondere aufgrund des Einsatzes in einem Fahrzeug. Außerdem muss die Schaltung zur Messung der Temperatur mittels des NTC-Thermistors im elektronischen LMM überarbeitet werden. Daher ist das System nicht in der Lage, den NTC-Thermistor nachzubilden. Wie in Abschnitt 3.3.3.2 anhand von Messwerten dargestellt, ist dies nicht kritisch für den Einsatz des LMM-Retrofit-Systems, da sich die NTC-Thermistoren der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten LMM ausreichend stark ähneln.

Die zu verbessernden Aspekte in Bezug auf das Platinendesign werden in Abschnitt 4.2 diskutiert.

Die Implementation einer Abhilfe für die beschriebenen Probleme ist ebenfalls Bestandteil weiterführender Arbeiten.

Das realisierte LMM-Retrofit-System ist in der Lage, gemäß der Anforderungen der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt 1.2), auf Basis einer messtechnisch ermittelten und durch Regression berechneten Kennlinie, das Ausgangssignal eines mechanisch arbeitenden LMMs originalgetreu nachzubilden. Auch die weiteren Eigenschaften des zu ersetzenden mechanischen LMMs werden durch das LMM-Retrofit nachgebildet.

Die Richtigkeit der ausgegebenen Signale ist durch Messungen im Labor belegt worden (siehe Abschnitt 4). Es müssen noch einige unmaßgebliche Verbesserungen an der Elektronik und Firmware vorgenommen werden.

Literatur

- [1] Analog Devices. *Single/Dual, +15 V/±5 V, 256-Position, I2C-Compatible Digital Potentiometer*. 2009. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5280_5282.pdf (besucht am 02.06.2022).
- [2] Atmel. *ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*. 2015. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (besucht am 10.07.2022).
- [3] Automotive Electronics Council. *AEC Documents*. 2022. URL: <http://www.aecouncil.com/AECDocuments.html> (besucht am 01.06.2022).
- [4] Richard Basshuysen. *Ottomotor mit Direkteinspritzung*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-658-01408-7.
- [5] Bayerische Motorenwerke AG München. *Schaltpläne: Modellreihe 7*. 4. Aufl. 1986.
- [6] Stefan Brummer. *Verpflichtung: Wie lange müssen Hersteller Ersatzteile anbieten?* 2021. URL: <https://www.stvo.de/78-news/563-verpflichtung-wie-lange-muessen-hersteller-ersatzteile-anbieten> (besucht am 28.05.2022).
- [7] Karl-Heinz Dietsche. *Ottomotorsteuerung für Young- und Oldtimer*. Hrsg. von Karl-Heinz Dietsche und Matthias Thiess. Bd. 1. HEEL Verlag GmbH, 2016. ISBN: 978-3-95843-331-1.
- [8] Diodes Incorporated. *2-CHANNEL LOW CAPACITANCE ESD PROTECTION ARRAY*. 2016. URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Diodes%20PDFs/DM1231-02S0.pdf> (besucht am 02.06.2022).
- [9] Robert Bosch GmbH. *Heissfilm-Luftmassenmesser Infoblatt*. 2018. URL: https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-solutions/sensortechnology/hot-film-airflow-sensor/ps_summary_hot-film_mass_meter_de.pdf (besucht am 30.05.2022).
- [10] Robert Bosch GmbH. *Heißfilm-Luftmassenmesser, Typ HFM 5*. 2012. URL: <https://www.ibs-gruppe.de/shop/media/pdf/7f/45/6e/Datenblatt-0-280-218-119.pdf> (besucht am 10.07.2022).
- [11] Texas Instruments. *DAC101C08xx 10-Bit Micro Power Digital-to-Analog Converter With an I2C-Compatible Interface*. 2016. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac101c081.pdf> (besucht am 07.07.2022).
- [12] Microchip Technology Inc. *Introduction to USB Type-C*. 2015. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001953a.pdf> (besucht am 02.06.2022).
- [13] Ltd. Murata Manufacturing Co. *Specification of Piezoelectric Ceramic Resonator*. 2019. URL: <https://www.murata.com/en/products/productdata/8801162231838/SPEC-CSTNE16M0V530000R0.pdf> (besucht am 02.06.2022).

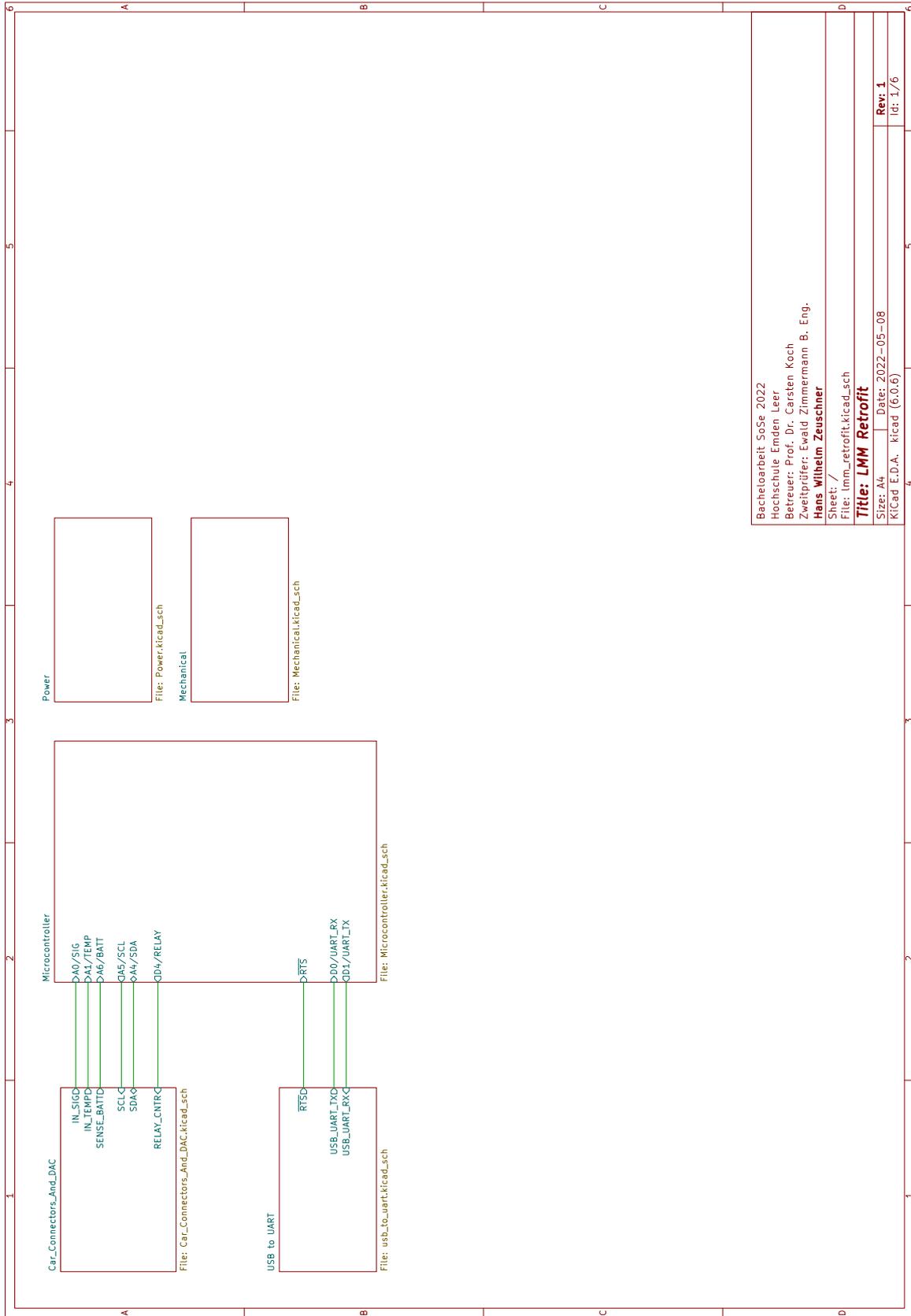
- [14] Omron. *Middle Power PCB Relay for Automotive and DC 12 V/24 V Applications G8G Relay*. 2021. URL: https://components.omron.com/us-en/datasheet_pdf/J263-E1.pdf (besucht am 02.06.2022).
- [15] Konrad Reif. *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-11211-0.
- [16] Fabio Lorenzo Schwarz. *Modernisierung der Benzineinspritzung von Oldtimern*. Techn. Ber. Hochschule Emden / Leer, 2021.
- [17] Silicon Labs. *USBXpress FamilyCP2102N Data Sheet*. 2020. URL: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/cp2102n-datasheet.pdf> (besucht am 02.06.2022).
- [18] Statista Research Department. *Jährliche Durchschnittstemperatur in Deutschland bis 2021*. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/914891/umfrage/durchschnittstemperatur-in-deutschland/> (besucht am 02.06.2022).
- [19] Gene Thompson. *Triumph TR7 ECU Schematic*. 2006. URL: http://www.team.net/TR8/tr8cca/wedgelab/injection/us_tr7/TR7_ECU.pdf (besucht am 07.07.2022).
- [20] tinkerit. *SecretVoltmeter.wiki*. 2009. URL: <https://code.google.com/archive/p/tinkerit/wikis/SecretVoltmeter.wiki> (besucht am 07.07.2022).

6 Anhang

6.1 Ausgabe des Tesprogramms

```
1 -----
2 LMM-Retrofit Assembly Test
3 Firmware Version: 1.0
4 Firmware Release Date: 09. Jun. 2022
5 Author: Hans Wilhelm Zeuschner
6 www.wizeus.de/lmm-ba
7 Compiled on: Jul  5 2022, 19:41:52
8 Compiler version:7.3.0
9 -----
10
11 Please follow the instructions that guide you through the tests.
12
13 ### Test-step: 1 ###
14 LED and Button test:
15 All three LEDs should light up.
16 Please press button 1.
17 Please press button 2.
18 ### Test-step: 2 ###
19 Analog supply voltage measurement:
20 Please supply the board with 12V
21 current supply voltage:12040
22 ### Test-step: 3 ###
23 Relay test:
24 The relay should click On and Off.
25 ### Test-step: 4 ###
26 I2C Devices:
27 Three addresses should be found: 0x09, 0x2C and 0x48.
28 Please check them manually in the following output:
29 Scanning...
30 I2C device found at address 0x09
31 I2C device found at address 0x2C
32 I2C device found at address 0x48
33 ### Test-step: 5 ###
34 Digi Pot Test:
35 Setting Digi Pot resistance to 25k.
36 Set SW4 to pos. 1.
37 Please measure between pins 27:TEMP and 6:V-.
38 Press button 1 to continue after measuring the resistance.
39 ### Test-step: 6 ###
40 DAC Test:
41 Outputting 4V.
42 Please measure between pins 7:SIG and 6:V-.
43 Press button 1 to continue after measuring the voltage.
44 ### Test-step: 7 ###
45 TAP Test:
46 Please measure between pins 8:TAP and 6:V-. Expected value: 7.7V (@
    12V in).
47 Press button 1 to continue after measuring the voltage.
48
49 ### Tests done. ###
```

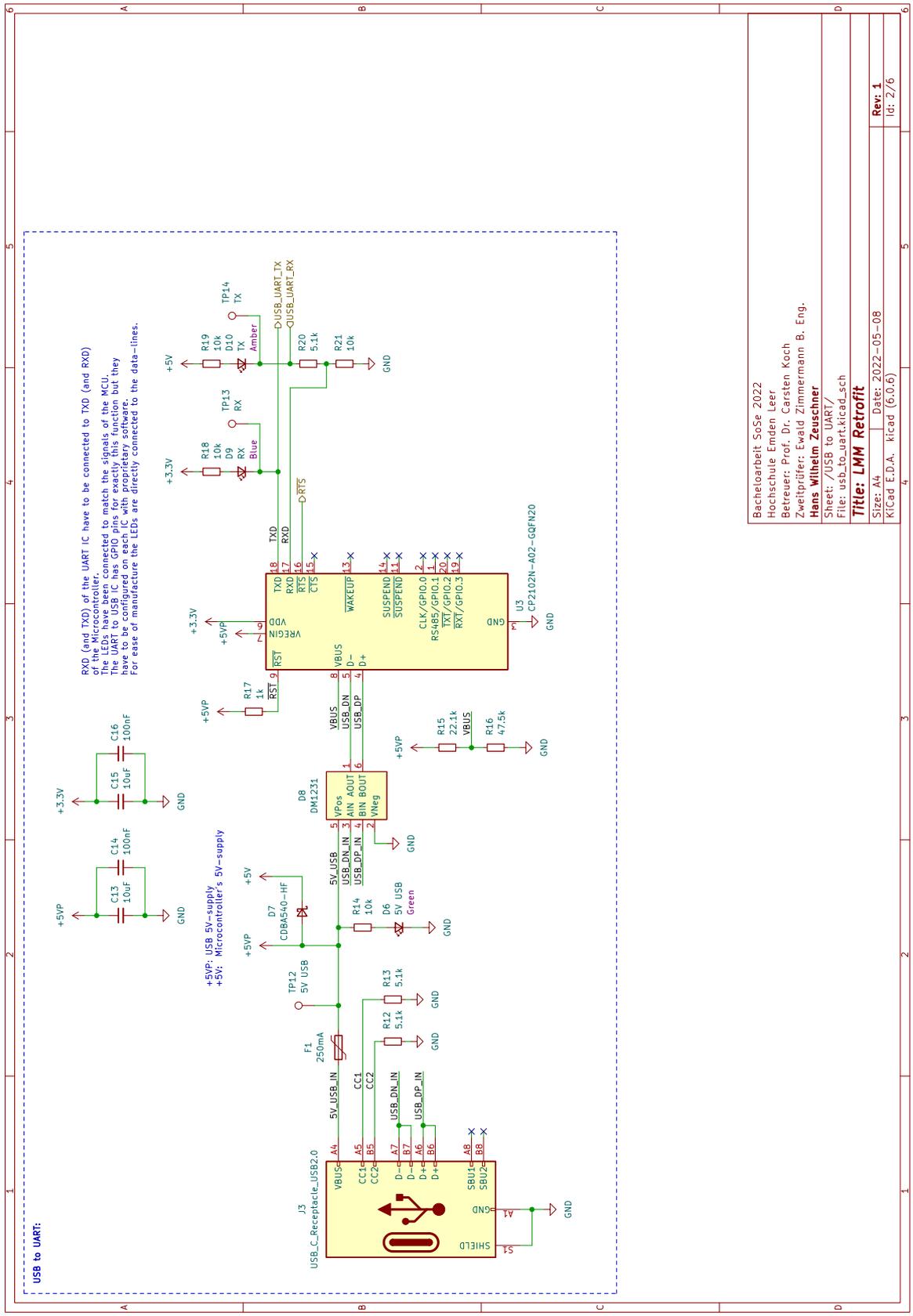
6.2 Schaltplan LMM-Retrofit



Bachelorarbeit SoSe 2022
 Hochschule Emden Leer
 Betreuer: Prof. Dr. Carsten Koch
 Zweitprüfer: Ewald Zimmermann B. Eng.
Hans Wilhelm Zeuschner
 Sheet: /
 File: lmm_retrofit.kicad_sch

Title: LMM Retrofit

Size: A4 Date: 2022-05-08 **Rev: 1**
 KiCad E.D.A. kicad (6.0.6) Id: 1/6

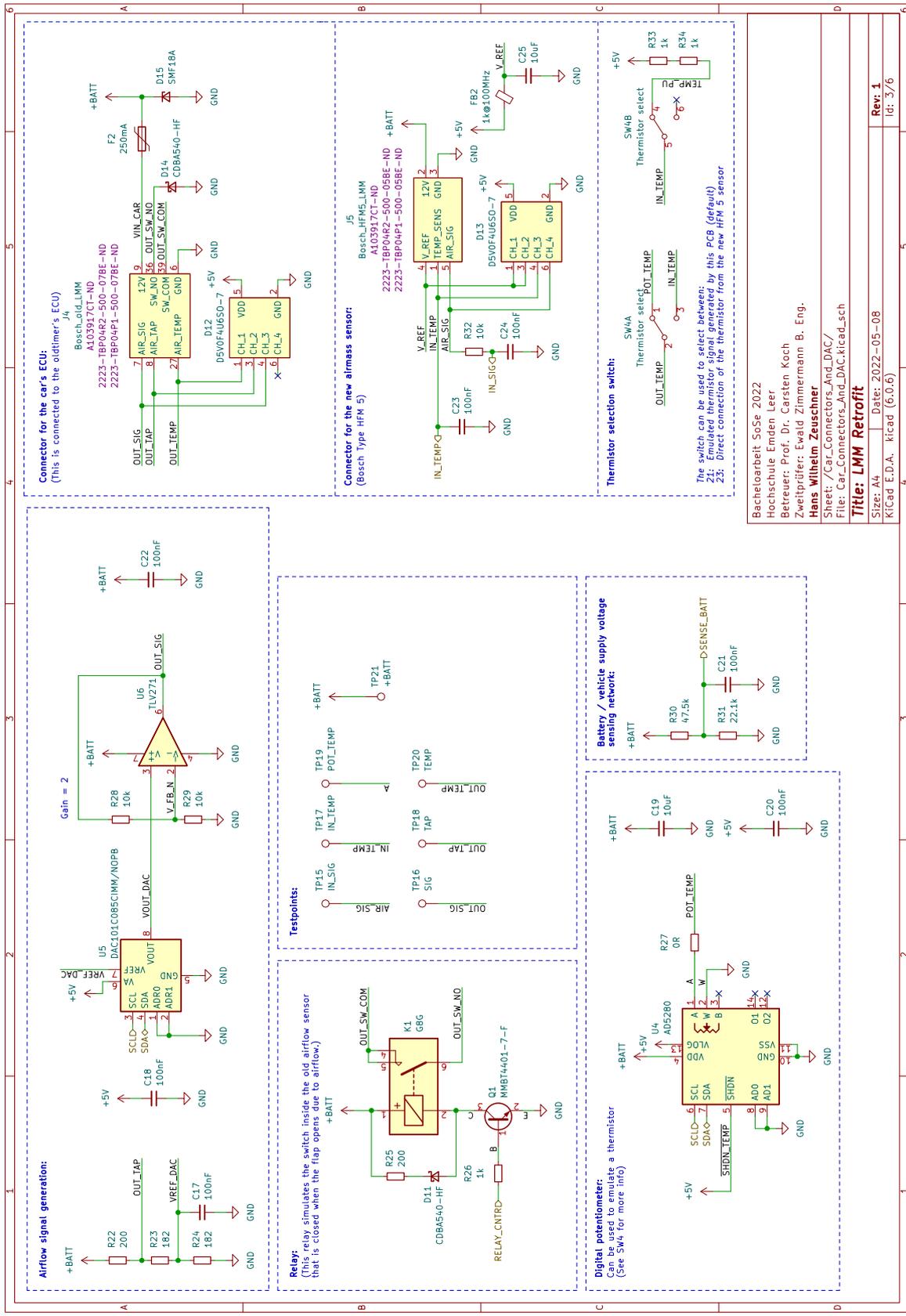


Bachelorarbeit SoSe 2022
Hochschule Emden Leer
Betreuer: Prof. Dr. Carsten Koch
Zweitprüfer: Ewald Zimmermann B. Eng.
Hans Wilhelm Zeuschner
Sheet: /USB to UART/
File: usb_to_uart.kicad.sch

Title: LMM Retrofit

Size: A4
Date: 2022-05-08
KiCad E.D.A. kicad (6.0.6)

Rev: 1
Id: 2/6



Connector for the car's ECU:
(This is connected to the oldtimer's ECU)

Connector for the new air mass sensor:
(Bosch Type HFM 5)

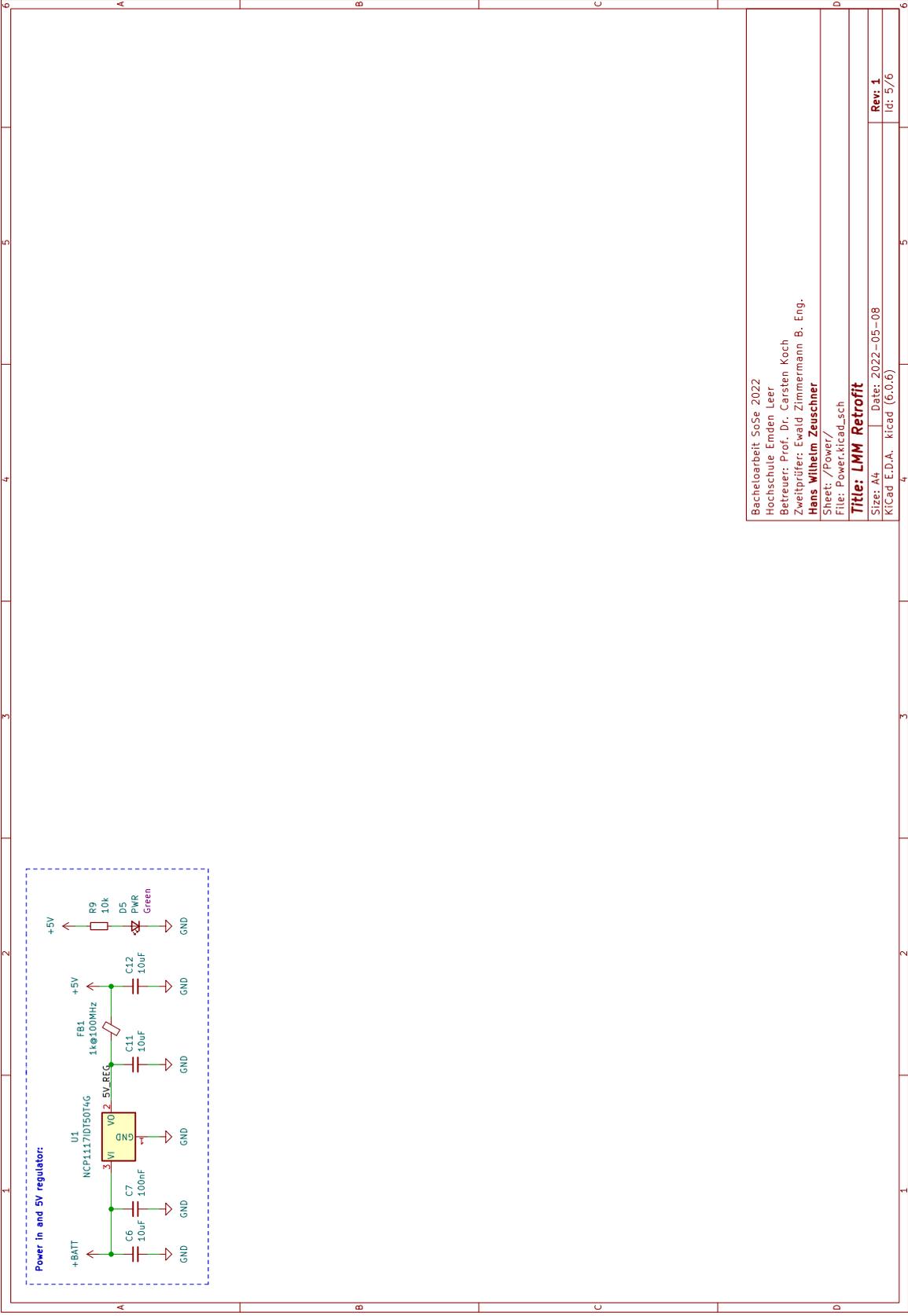
Relay:
(This relay simulates the switch inside the old air flow sensor that is closed when the flap opens due to airflow)

Digital potentiometer:
Can be used to emulate a thermistor (See SW4 for more info)

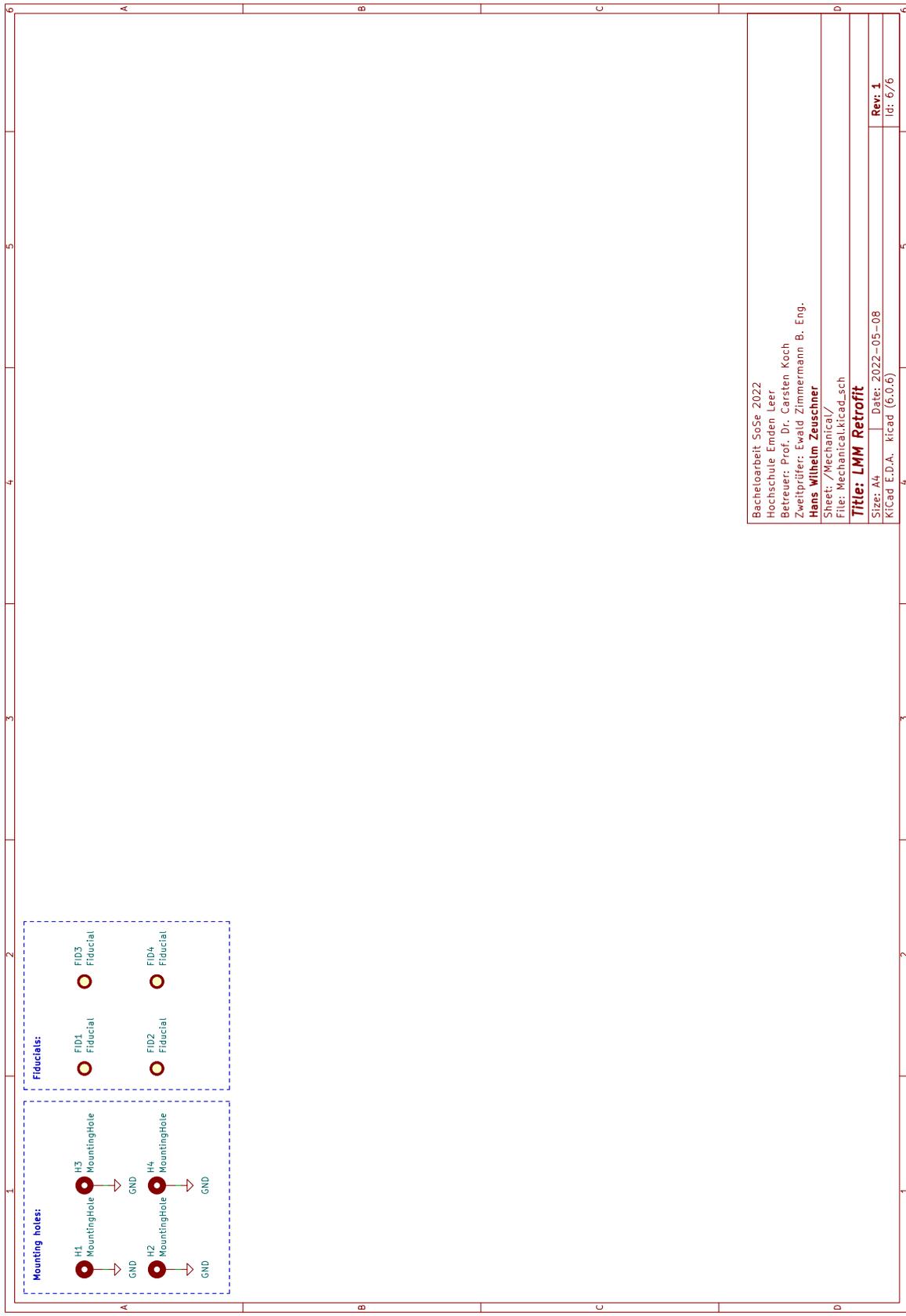
Thermistor selection switch:

The switch can be used to select between:
21: Emulated thermistor signal generated by this PCB (default)
23: Direct connection of the thermistor from the new HFM 5 sensor

Bachelorarbeit SoSe 2022
Hochschule Emden Leer
Betreuer: Prof. Dr. Carsten Koch
Zweitprüfer: Ewald Zimmermann B. Eng.
Hans Wilhelm Zeuschner
Sheet: /Car_Connectors_And_DAC/
File: Car_Connectors_And_DAC.kicad_sch
Title: LMM Retrofit
Size: A4 Date: 2022-05-08
KiCad E.D.A. kicad (6.0.6)



Bachelarbeit SoSe 2022	
Hochschule Emden Leer	
Betreuer: Prof. Dr. Carsten Koch	
Zweitprüfer: Ewald Zimmermann B. Eng.	
Hans Wilhelm Zeuschner	
Sheet: /Power/	
File: Power.kicad_sch	
Title: LMM Retrofit	
Size: A4	Date: 2022-05-08
KiCad E.D.A.	kicad (6.0.6)
Rev: 1	
Id: 5/6	

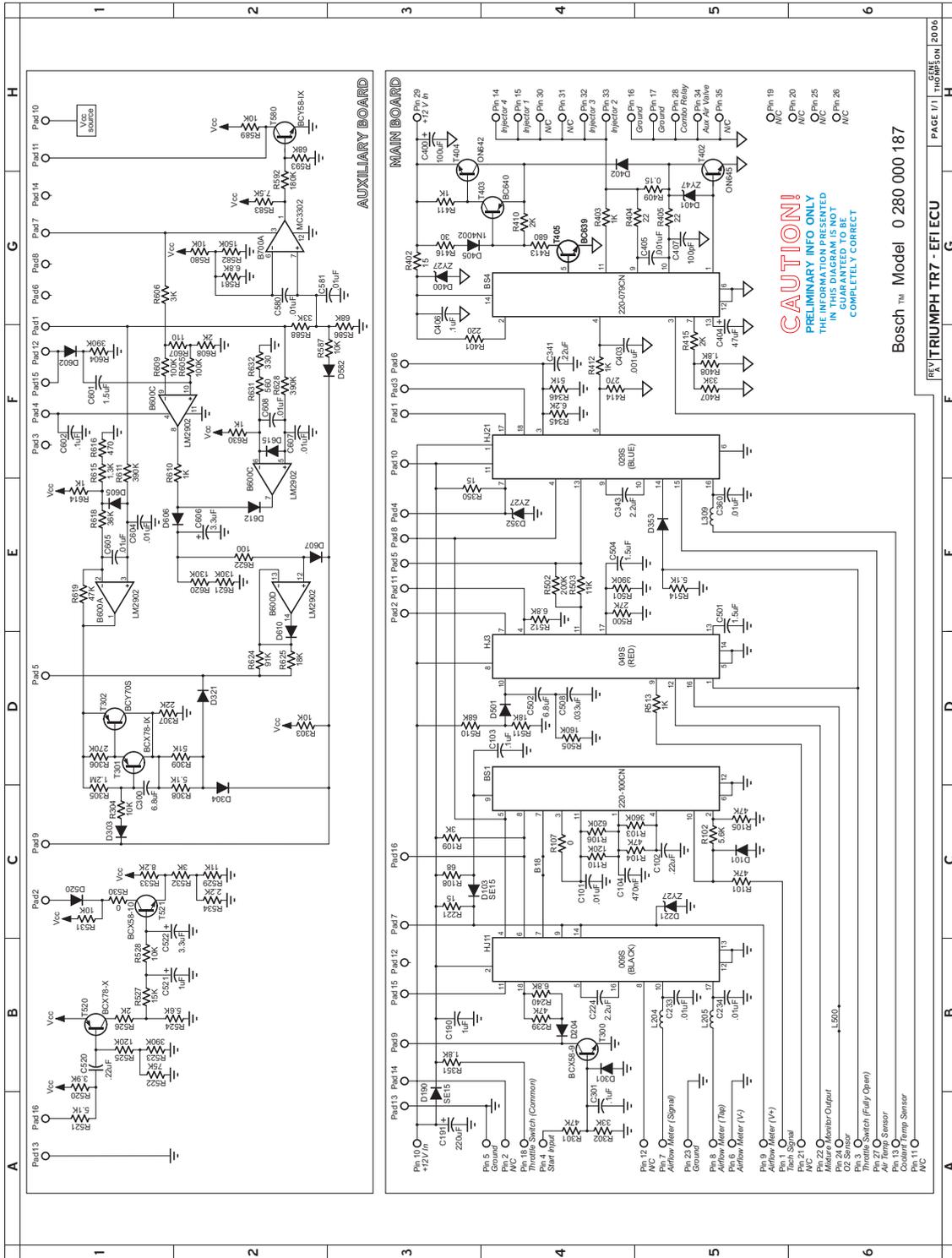


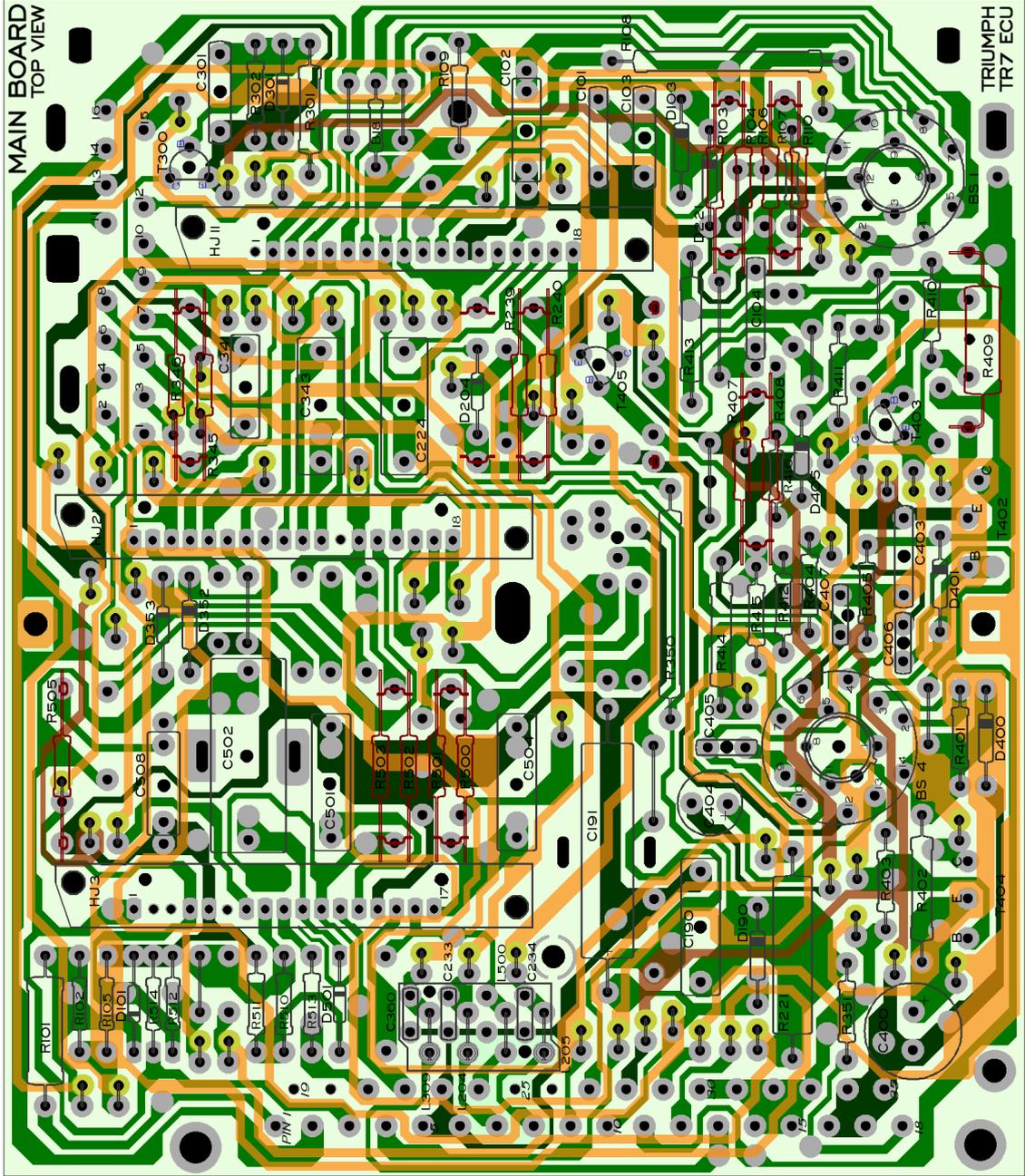
Bachelorarbeit SoSe 2022
Hochschule Emden Leer
Betreuer: Prof. Dr. Carsten Koch
Zweitprüfer: Ewald Zimmermann B. Eng.
Hans Wilhelm Zeuschner
Sheet: /Mechanical/
File: Mechanical.kicad.sch

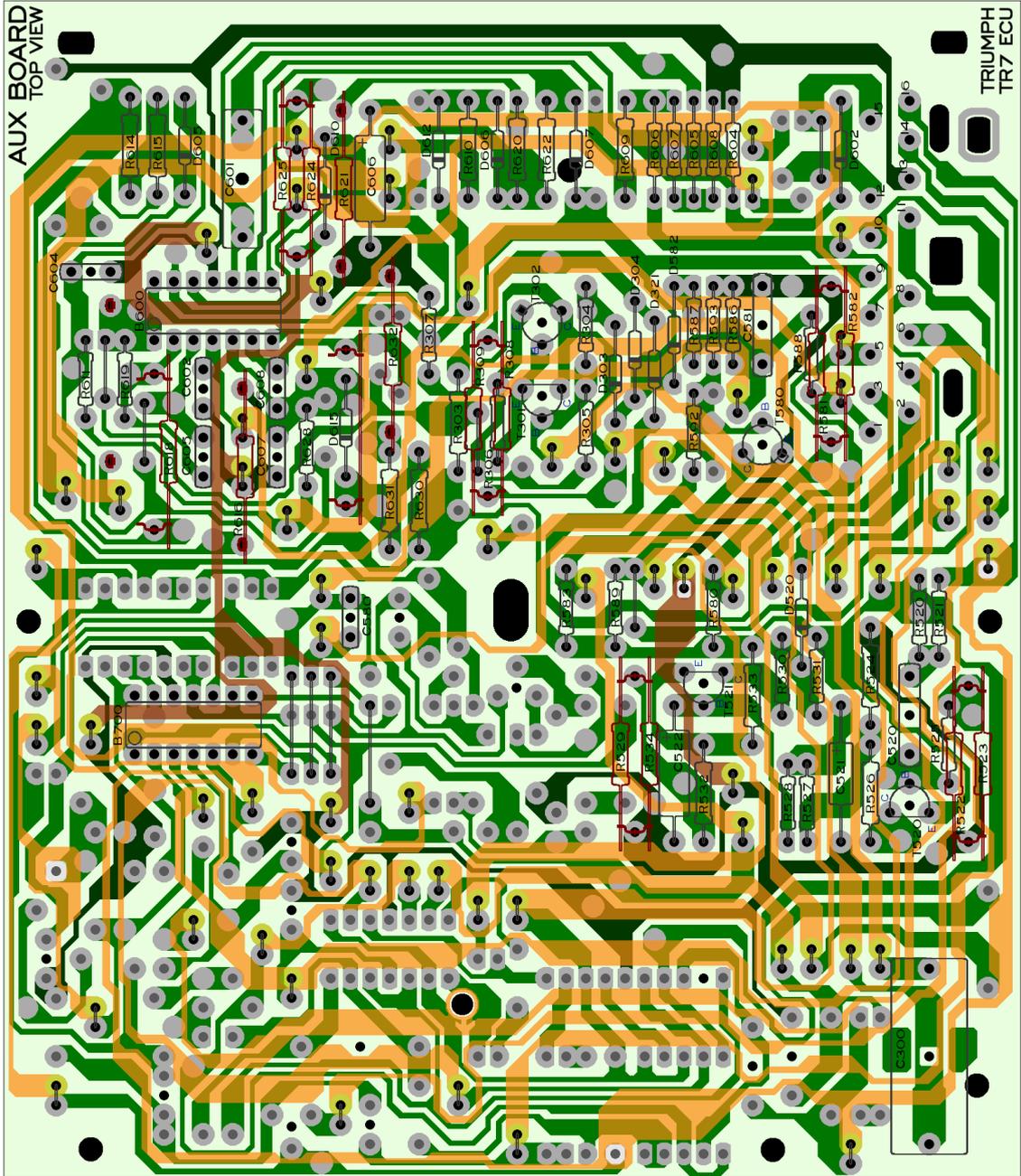
Title: LMM Retrofit

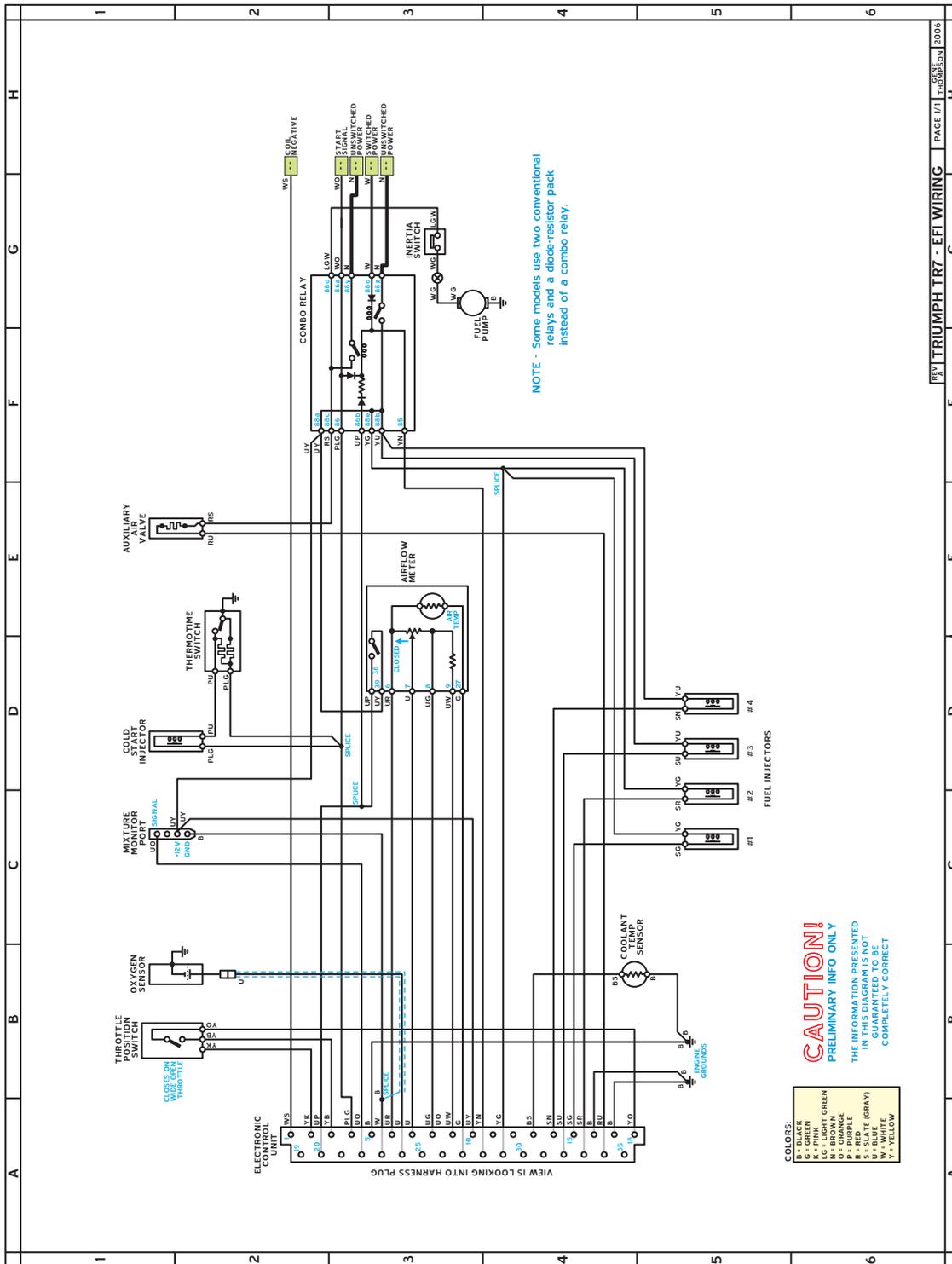
Size: A4 Date: 2022-05-08 **Rev: 1**
Kicad E.D.A. kicad (6.0.6) Id: 6/6

6.3 Schaltplan Triumph TR7 Motorsteuergerät









NOTE - Some models use two conventional relays and a diode-resistor pack instead of a combo relay.

CAUTION!
PRELIMINARY INFO ONLY
THE INFORMATION PRESENTED
HEREIN IS FOR INFORMATION ONLY
AND IS NOT GUARANTEED TO BE
COMPLETELY CORRECT

W	WHITE
B	BROWN
Y	YELLOW
R	RED
G	GREEN
BK	BLACK
OR	ORANGE
P	PINK
GR	GRAY
BL	BLUE
BR	BROWN
PK	PINK
GN	GREEN
OR	ORANGE
BL	BLUE
Y	YELLOW
W	WHITE

6.4 Bauteilliste

Qty	Value	MPN
17	100nF	UMK212B7104KGHT
8	10uF	TMK212BBJ106MGHT
1	5V USB	150080GS75000
4	CDBA540-HF	CDBA540-HF
2	D5V0F4U6SO-7	D5V0F4U6SO-7
1	DM1231	DM1231-02SO-7
1	ERROR	150080RS75000
1	LED1	150080BS75000
1	LED2	150080AS75000
1	PWR	150080GS75000
1	RX	150080BS75000
1	SMF18A	SMF18A
1	TX	150080AS75000
2	250mA	0ZCJ0025AF2E
2	1k@100MHz	ACML-0805-102-T
1	Bosch_HFM5_LMM	0 280 217 531
1	Bosch_old_LMM	0 280 203 002
1	ICSP	PH2RA-06-UA
1	PC	FR20206HBNN
1	USB_C_Receptacle_USB2.0	USB4105-GF-A
1	G8G	G8G-1A7R DC12 BY OMR1
1	MMBT4401-7-F	MMBT4401-HF
1	0R	AC0805JR-070RL
2	182	CRCW0805182RFKEA
2	200	ESR10EZPF2000
6	1k	CRGCQ0805F1K0
5	5.1k	CRG0805F5K1
14	10k	CRGCQ0805J10K
2	22.1k	CR0805-FX-2212ELF
2	47.5k	CR0805-FX-4752ELF

Tabelle 1: Bauteilliste

Qty	Value	MPN
1	BTN1	TS03-66-95-BK-260-LCR-D-67
1	BTN2	TS03-66-95-BK-260-LCR-D-67
1	Reset	PTS815 SJK 250 SMTR LFS
1	Thermistor select	JS202011SCQN
1	AD5280	AD5280BRUZ50
1	ATmega168-20A	ATMEGA168-20AU
1	CP2102N-A02-GQFN20	CP2102N-A02-GQFN20
1	DAC101C085C1MM/NOPB	DAC101C085C1MM/NOPB
1	NCP1117IDT50T4G	NCP1117IDT50T4G
1	TLV271	TLV271QDRQ1
1	16MHz	CSTNE16M0V530000R0

Tabelle 2: Bauteilliste (fortgesetzt)