



PRÜFSIMULATOR

IPA M. Lacher

Condair Group AG
Gwattstrasse 17
8808 Pfäffikon SZ

Inhalt

1	Einleitung.....	4
1.1	Beispielfall.....	4
1.2	Geräteanalyse.....	4
1.3	Ziel des Prüfsimulators	4
2	Planung	5
2.1	Morphologischer Kasten	5
3	Aufgabenstellung.....	6
4	Schaltungsentwicklung.....	8
4.1	Blockschaltbild.....	8
4.2	Spannungsversorgung	9
4.3	Analoge Signalerzeugung	10
4.4	Analoge Spannungsausgänge	11
4.5	Analoge Stromausgänge.....	12
4.6	Hochstromausgänge.....	13
4.7	24VDC Ausgänge.....	15
4.8	Relay Ausgänge.....	15
4.9	230VAC Eingänge.....	15
4.10	24VDC Eingänge.....	16
4.11	Relay Eingänge.....	16
4.12	Analoge Eingänge	16
4.13	Mikrocontroller	17
4.14	RS-485 Transceiver	18
4.15	Digitales Potentiometer	18
5	Layout	19
5.1	Eigenschaften	19
5.2	Polygone	19
5.3	Pin Mapping.....	20
5.4	Stecker Beschriftungen.....	22
6	Bestückung	23
7	Embedded-Software.....	24
7.1	Konzept.....	24
7.2	Implementation.....	25
7.3	Main.....	25
7.4	Startup	25
7.5	Definitions	25

7.6	Digitale Eingänge	25
7.7	Digitale Ausgänge	25
7.8	Analoge Eingänge	25
7.9	Analoge Spannungsausgänge	26
7.10	Analoge Stromausgänge	26
7.11	Clock	26
7.12	Timers	26
7.13	ADC	26
7.14	UART	27
8	Messungen	28
8.1	Versorgungsspannungen	28
8.2	Maximale Strombelastung	29
8.3	24V Ausgänge	30
8.4	Analoge Spannungsausgänge	32
8.5	Analoge Stromausgänge	34
8.6	Digitales Potentiometer	38
9	Terminplanabgleich	39
10	Zielerreichung und Fortsetzung	40
11	Quellenverzeichnis	41
12	Anhang	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grober Terminplan, vom Fachvorgesetzten vorgegeben	7
Tabelle 2: Eingänge	8
Tabelle 3: Ausgänge	8
Tabelle 4: Geschätzter maximaler Stromverbrauch	9
Tabelle 5: Simulationswerte analoge Stromquelle	12
Tabelle 6: Relay G2RL-1A-CV-HA Parameter	14
Tabelle 7: Relay RY211024 Parameter	15
Tabelle 8: Pin Mapping digitale Eingänge	20
Tabelle 9: Pin Mapping digitale Ausgänge	20
Tabelle 10: Pin Mapping PWM-Ausgänge	21
Tabelle 11: Pin Mapping analoge Eingänge	21
Tabelle 12: UART Konfiguration	27
Tabelle 13: Messpunkte der 24VDC Ausgänge	30
Tabelle 14: Messpunkte der analogen Spannungsausgänge in Abhängigkeit zur Last	33
Tabelle 15: Anhang	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Morphologischer Kasten	5
Abbildung 2: Blockschema Gerät- Simulator	6
Abbildung 3: Blockschaltbild V1.2	8
Abbildung 4: Signalerzeugung und Amplitudengang	10
Abbildung 5: Ausgangsstrom in Abhängigkeit des Lastwiderstands	11
Abbildung 6: Versuchsaufbau gemäss Schaltung 4	13
Abbildung 7: Prinzip Hochstromausgänge	14
Abbildung 8: STM32F303ZD Blockschaltbild (STMicroelectronics, 2020)	17
Abbildung 9: Prinzip des Tranceivers (Texas Instruments, 2020)	18
Abbildung 10: Digitales Potentiometer Prinzip	18
Abbildung 11: Top Layer (rot) und Bottom Layer (blau)	19
Abbildung 12: Stecker Beschriftungen	22
Abbildung 13: Lötschablone	23
Abbildung 14: Software Konzept	24
Abbildung 15: Versuchsaufbau 24VDC Ausgänge	30
Abbildung 16: 24VDC Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Last	30
Abbildung 17: Anstiegsdauer 24VDC Ausgang	31
Abbildung 18: Verzögerungszeit 24VDC Ausgang	31
Abbildung 19: Kennlinie Ausgangsspannung Last	33
Abbildung 20: Anstiegszeit analoge Spannungsausgänge	33
Abbildung 21: Output Noise analoge Spannungsausgänge	33
Abbildung 22: Testplatine analoge Stromausgänge	34
Abbildung 23: Zeitplan V1.05	39

Schaltungsverzeichnis

Schaltung 1: Spannungsversorgung Stecker	9
Schaltung 2: Schaltregler	9
Schaltung 3: Längsregler	9
Schaltung 4: Tiefpass 1.Ordnung	10
Schaltung 5: Analoger Spannungsausgang	11
Schaltung 6: Gleichstromausgang	12
Schaltung 7: Gleichstromausgang	12
Schaltung 8: Spannungsabhängige Stromquelle mit OPV	13
Schaltung 9: Hochstrom-Relay Beschaltung	14
Schaltung 10: Hochstrom-Relay	14
Schaltung 11: Relay Ausgang	15
Schaltung 12: 24VDC Ausgang	15
Schaltung 13: 230VAC Eingang	15
Schaltung 14: 24VDC Eingang	16
Schaltung 15: Beide Relay Eingänge	16
Schaltung 16: Beide analog Eingänge	16
Schaltung 17: Analoge Stromquelle	34
Schaltung 18: Analoge Stromausgänge, korrigierte Version	35

1 Einleitung

In der Condair Group AG werden viele Softwaretests durchgeführt. Diese manuell durchgeführten Tests sind sehr zeitaufwendig und somit auch recht kostspielig. Das Projekt Prüfsimulator befasst sich mit der Idee, das Testen der Software automatisieren zu können.

1.1 Beispielfall

Der Condair RS, ein mit Heizstäben betriebener Dampfluftbefeuchter, verfügt über eine Niveaueinheit, welche über Reed-Kontakte den Füllstand des Dampfzylinders misst und diesen mithilfe von drei 24V-Signalen an sein Driverboard sendet. Öffnet das Einlassventil des Zylinders, muss sich dieser langsam füllen. Ist das Einlassventil geschlossen, aber das Niveau im Zylinder steigt trotzdem, muss ein Fehler von der Software angezeigt werden, mit Verdacht auf ein undichtes Einlassventil.

Solche hardwaremässige Zusammenhänge müssen simuliert und die Reaktion der Software über Modbus ausgelesen und verifiziert werden können. Der Prüfsimulator soll also die Steuersignale der Geräte einlesen und das Verhalten von verwendeten Sensoren, Anforderungssignalen und Aktoren simulieren können.

1.2 Geräteanalyse

Zu Beginn sollte nur die Software des Gerätes „Condair RS“ geprüft werden können. In der Vorbereitung zeigte sich, dass die Geräte „EL“, „ME“ und „DL“ dem „RS“ in vielen Bereichen ähneln. Alle vier Geräte sind mit einem Integrated Controller ausgestattet, welcher mithilfe eines zusätzlichen Driverboards die Hardware ansteuert. Das Driverboard variiert aufgrund der verschiedenen Anforderungen der Geräte in der Komplexität, jedoch sind die Steuer- und Sensorsignale sehr einheitlich.

1.3 Ziel des Prüfsimulators

Der Prüfsimulator soll mit einer einheitlichen Hardware und der dazugehörigen Embedded-Software die vier oben genannten Geräte testen können. Eine PC-Software steuert den Prüfsimulator und setzt die gerätespezifischen Prüfprotokolle um. Über Modbus konfiguriert die PC-Applikation die Geräte auf die gewünschte Betriebsform. Mithilfe des Prüfsimulators werden Abläufe simuliert und das Verhalten der Gerätesoftware überprüft.

2 Planung

2.1 Morphologischer Kasten

Als Vorbereitung für die IPA wurden die 4 Geräte analysiert und deren Ein- und Ausgänge aufgelistet. Mithilfe eines Morphologischen Kastens wurde entschieden, wie der Prüfsimulator aussehen sollte. Dazu wurden für insgesamt vier Kategorien drei verschiedene Lösungsansätze aufgelistet.

Geräteunterstützung	RS	RS, EL	RS, EL, ME, DL
Hardware	Fix	Freie „Slots“	Modulierbar
Embedded SW	Komplett	Macro commands	Micro commands
PC SW	Logger	Fixe Testabläufe	Interaktives GUI

Abbildung 1: Morphologischer Kasten

In einer Sitzung wurde zusammen mit Christian Walser beschlossen, die oben gelb abgebildete Variante zu verwenden.

Geräteunterstützung: Der Prüfsimulator soll alle 4 Geräte prüfen können. Die verschiedenen Ein- und Ausgänge der vier Geräte sind in ihrer Funktion sehr ähnlich, einzig die Anzahl und kleine Zusatzanforderungen variieren in deren Anforderungen an den Prüfsimulator.

Hardware: Die Hardware fix auf ein Gerät abzustimmen fällt mit der Entscheidung der Geräteunterstützung weg. Eine modulierbare Hardware, also ein Prüfsimulator, welcher mithilfe von zusätzlichen Steckprints praktisch unbegrenzte Möglichkeiten der Ergänzung bietet, ist zu aufwendig. Ausserdem müsste für jeden Steckprint die Embedded Software angepasst werden. Die festgelegte Variante mit freien Slots soll alle Ein- und Ausgangstypen der Geräte simulieren können. Zusätzlich sollen für jeden Ausgangstyp einige überschüssige Anschlüsse zur Verfügung stehen.

Embedded Software: Die Variante „Komplett“ bedeutet, dass die gesamte Simulationssoftware auf der Embedded Stufe implementiert wird. „Macro commands“ würde diverse geräteabhängige Zusammenhänge bereits implementieren, beispielsweise den Zusammenhang der drei 24V Signale der Niveaueinheit. Die ausgewählte Variante „Micro commands“ stellt einzig und allein die Ansteuerung für die Ein- und Ausgänge des Prüfsimulators bereit. Dies bringt den grossen Vorteil, dass bei einem neuen Testprotokoll oder einem neuen Gerät nur noch die PC-Software angepasst werden muss.

PC-Software: Die PC-Software soll ein interaktives GUI werden. Der Benutzer soll sowohl fix programmierte Testprogramme ausführen, als auch alle Ein- und Ausgänge manuell ansteuern können.

3 Aufgabenstellung

Aus der Vorarbeit ergab sich folgende Aufgabenstellung, zitiert aus *Aufgabenstellung IPA Markus_Final.docx*

IPA Markus Lacher, Hardware & Embedded Software für Prüfsimulator

Ausgangslage

Condair Group ist mit über 720 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der weltweit führende Hersteller im Bereich der kommerziellen und industriellen Luftbefeuchtung und Verdunstungskühlung. Mit professionellen, innovativen Luftbefeuchtungssystemen setzen wir heute auch neue Maßstäbe in Bezug auf eine gesunde und komfortable "Hydrierung" der Raumluft in Büros und Privathaushalten. Mit unserer Marke "Condair" setzen wir uns, in all unseren Anwendungen, für Energieeffizienz und Hygiene ein. Wir exportieren in über 50 Länder auf der ganzen Welt.

Das Produktportfolio der Condair Group AG wächst und durch ständig wachsende Anforderungen und Normen werden die Produkte und die dazugehörige Hard- und Software immer umfangreicher. Damit in Zukunft im Bereich der Softwareentwicklung Entlastung geschaffen werden kann, streben wir ein neues Verfahren für automatisierte Tests verschiedener Gerätefunktionen an. Abläufe, Routinen und Fehlverhalten sollen mit einem Prüfsimulator automatisch getestet und verifiziert werden können.

Aufgabenstellung

Die IPA soll einen Teil des neuen Prüfsimulators umfassen. Der ganze Prüfsimulator ist ein umfangreiches Projekt, speziell weil verschiedene Gerätefunktionen getestet werden sollen und so ein umfangreiches Wissen über die Geräte nötig ist. Dies würde den Umfang einer IPA überschreiten.

Das nachfolgende Blockschema zeigt das Konzept des Prüfsimulators. Auf der linken Seite ist das Gerät schematisch dargestellt, welches aus einer Steuerplatine „IC- Integrated Controller“, einer Treiberplatine „DB- Driver Board“ und verschiedenen Aktoren (Schützen, Pumpen, Ventile) besteht. Um die Hard- & Softwarekomponenten des Geräts prüfen zu können, soll ein Simulator entwickelt werden, welcher die Steuersignale der Treiberplatine auswertet, die Aktoren simuliert und diese Signale dann an einen Computer per serieller Schnittstelle weitergibt.

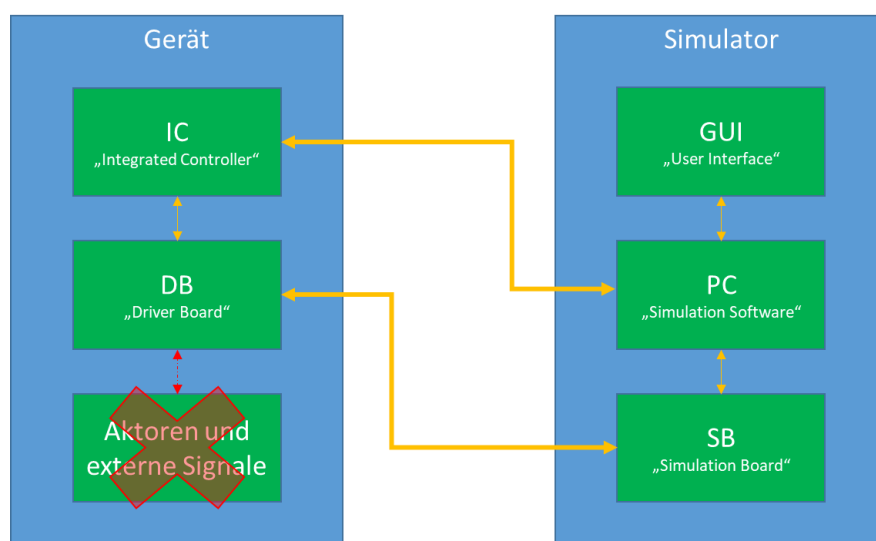


Abbildung 2: Blockschema Gerät- Simulator

Der Simulator besteht aus einer Elektronik, welche die verschiedenen Signale der Treiberplatine „SB Simulation Board“ auswertet und die nötigen Rückmeldungen simulieren kann. Es handelt sich hierbei um folgende Funktionen:

- 230VAC digital Eingang
- 24VDC digital Eingang
- 0-10VDC analog Eingang
- 0-24VDC analog Ausgang
- 0-20mA analog Ausgang
- Potentialfreie Signalsteuerung
- 1-3A Konstant-Strom Ausgang

Vorarbeit

Als Vorbereitung der IPA soll das Konzept für den gesamten Simulator erarbeitet werden inklusive Blockschema für das Simulator Board. Dieses soll die verschiedenen Ein- & Ausgänge des Simulationsboards darstellen, um alle nötigen Funktionen aufzuzeigen, welche benötigt werden, um die Funktionen abdecken zu können.

Umfang IPA

Die IPA selbst umfasst folgende technischen Aufgaben:

- Ausarbeitung des detaillierten Schemas anhand des Blockschemas, inkl. Definition der wichtigen Komponenten
- Layouten der Hardware für das Simulation Board
- Schreiben eines Testprogramms in C (Keil uVision) zum Prüfen der verschiedenen Ein- & Ausgänge des Simulation Boards
- Schreiben der Dokumentation und des Testberichts

Abgrenzung

Wie bereits zu Beginn erwähnt gehört das Erarbeiten des Konzepts inkl. Blockschema nicht zur IPA. Des Weiteren ist auch die eigentliche Simulationssoftware, welche die Gerätefunktionen testet, nicht Inhalt der IPA.

Die serielle Kommunikation vom Gerät zum PC ist nicht Teil der IPA.

Zeitraumen für die Aufgabe:

Start IPA: 14.4.20 08.30Uhr

Abgabe der IPA: 8.5.20 17.00Uhr

Grober Soll- Terminplan

Tabelle 1: Grober Terminplan, vom Fachvorgesetzten vorgegeben

Komponenten definieren	10
Simulation durchführen	8
Schema erstellen	16
Layout erstellen	20
Software Konzept entwickeln	10
Software schreiben	24
Hardware testen	12
Dokumentieren	20
Total	120

4 Schaltungsentwicklung

4.1 Blockschaltbild

In der Vorbereitung für die IPA wurden alle benötigten Ein- und Ausgänge in der Excel Tabelle Ein_Ausgänge.xlsx aufgelistet. Diese ist im Anhang angefügt. Die nachfolgenden Tabellen listen die verschiedenen Ein- und Ausgangstypen auf. Die tatsächliche Anzahl bezieht sich auf die im Prüfsimulator umgesetzte Anzahl.

Tabelle 2: Eingänge

Art des Eingangs	Mindestanzahl	Tatsächliche Anzahl
230VAC	8	10
24VDC	18	22
0-10V Analog	1	2
Relay	1	2

3: Ausgänge

Art des Ausgangs	Mindestanzahl	Tatsächliche Anzahl
230VAC Relay	2	4
24VDC	15	18
0-24V Analog	5	7
0-20mA Analog	2	3
PT1000	1	1
High Current	2	2

Tabelle

Aus den gezählten Ein- und Ausgängen wurde das Blockschaltbild für die Hardware entwickelt. Die Position der Ein- und Ausgänge sowie die Anforderungen an die Speisung und an die CPU sind aufgelistet und dienen als Vorlage für die Leiterplatte.

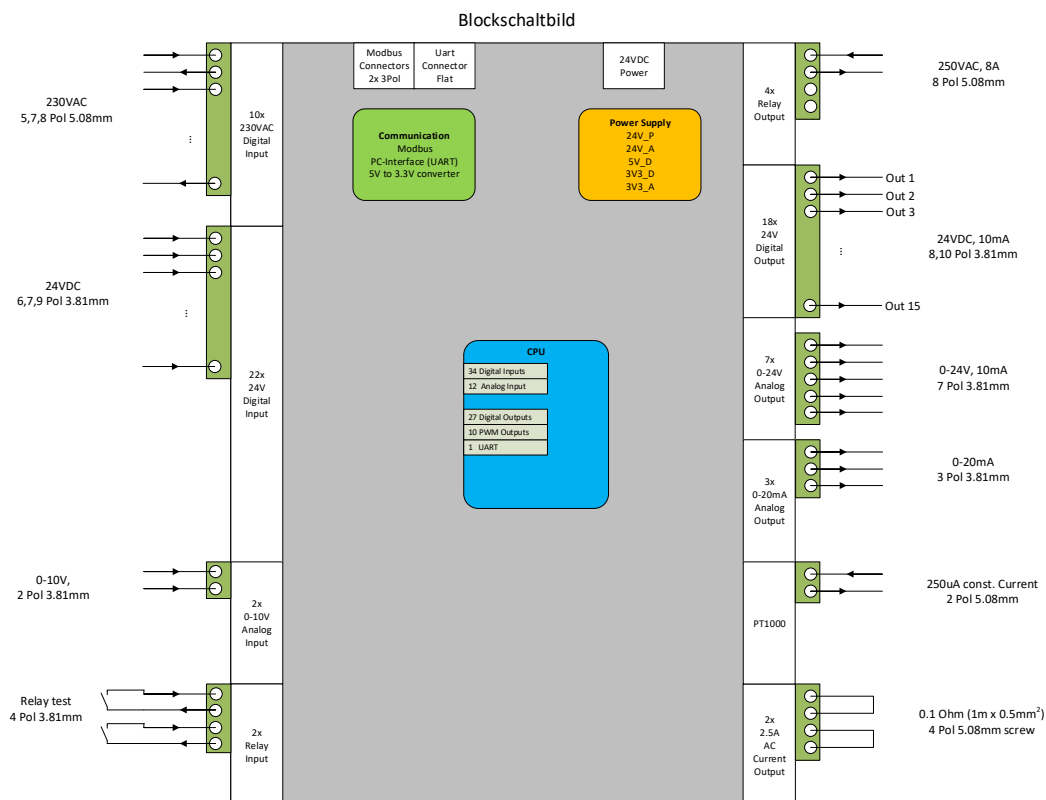


Abbildung 3: Blockschaltbild V1.2

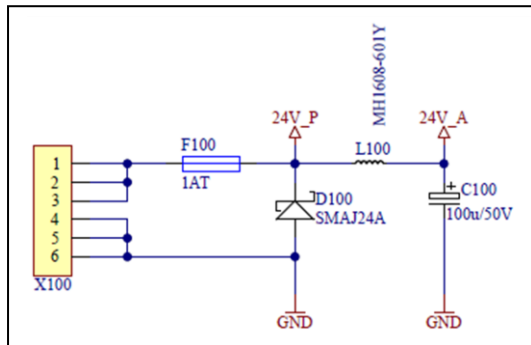
4.2 Spannungsversorgung

Der Prüfsimulator wird mit 24VDC gespeisen. Auf dem Print wird die Spannung mithilfe eines Schaltreglers auf 5 Volt und mit einem Längsregler von 5V auf 3.3V geregelt. Die 24 sowie 3.3 Volt sind mit einem Tiefpassfilter 2.Ordnung versehen, um die digitale Versorgung von der Analogen zu trennen.

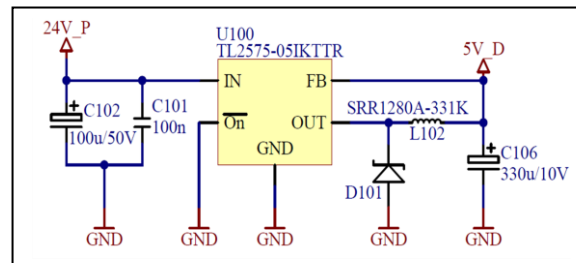
Die berechnete maximale Strombelastung beträgt ca. 800mA. Die 24V Speisung auf dem Print wird auf ein Ampère abgesichert, um die Schaltungen vor Kurzschlüssen zu sichern. Um die Schaltung für Überspannung zu schützen wurde nach der Sicherung eine Suppressordiode eingesetzt.

Tabelle 4: Geschätzter maximaler Stromverbrauch

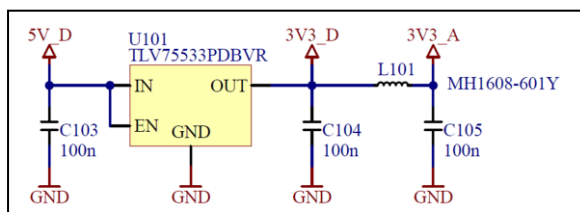
Verbraucher	Anzahl	Strom [mA]	Spannung [V]	Leistung [W]	Strom à 24V [mA]
230VAC Input	10	5	3.3	0.17	6.88
24VDC Input	22	10	24	5.28	220.00
Relais Input	2	10	24	0.48	20.00
Analog Input	2	1	10	0.02	0.83
Relais Output	4	10.2	24	0.98	40.80
24VDC Output	18	15	24	6.48	270.00
Voltage Output	7	10	24	1.68	70.00
Current Output	3	30	24	2.16	90.00
High Current	2	10	24	0.48	20.00
Power Supply	1	50	24	1.20	50.00
MCU	1	50	3.3	0.17	6.88
Total				19.09	795.38



Schaltung 1: Spannungsversorgung Stecker



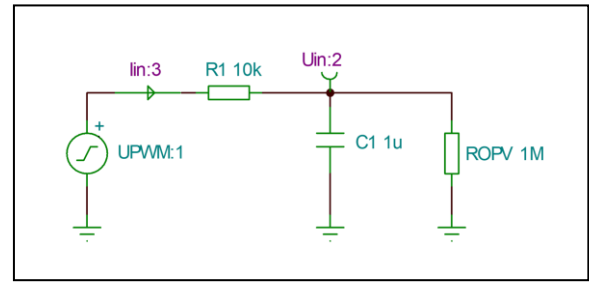
Schaltung 2: Schaltregler



Schaltung 3: Längsregler

4.3 Analoge Signalerzeugung

Für das Steuern der analogen Ausgänge werden viele Spannungssignale benötigt. Da die meisten Mikrocontroller sehr wenige DA-Wandler enthalten, werden die Spannungen durch Pulsweitenmodulation erzeugt. Ein passiver Tiefpassfilter 1.Ordnung filtert das PWM-Signal des Mikrocontrollers. Dadurch entsteht eine Spannung abhängig von der Pulsweite des PWM-Signals.



Schaltung 4: Tiefpass 1.Ordnung

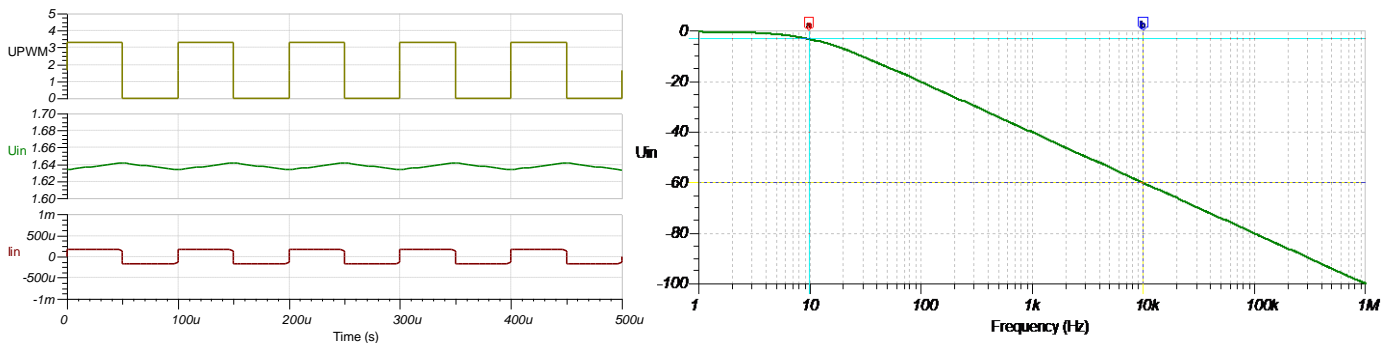


Abbildung 4: Signalerzeugung und Amplitudengang

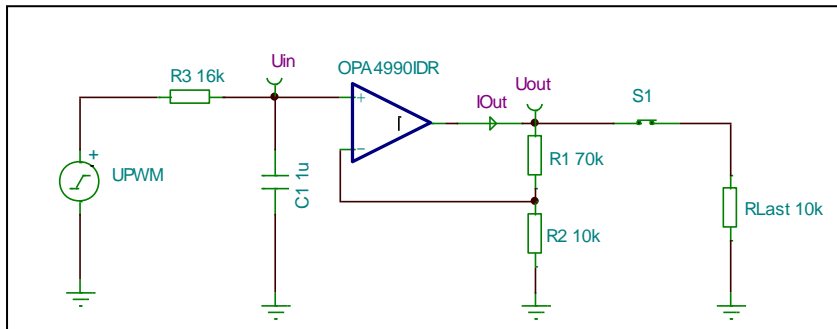
Die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters beträgt 9.76Hz. Bei einer PWM-Frequenz von 10kHz entspricht in die Dämpfung 60.05dB. Die Eingangsspannung U_{in} schwankt um etwa 18mV. Die Stromstärke beträgt weniger als 1mA, dadurch wird der Mikrocontroller nicht zu stark belastet.

$$\frac{18mV}{3300mV} * 100\% = 0.545\%$$

Die Schwankung im Signal ist mit weniger als 1% vernachlässigbar.

4.4 Analoge Spannungsausgänge

Mindestens 5 analoge Spannungsausgänge müssen zwischen 0 und 24V gesteuert werden können. Durch einen nichtinvertierenden Verstärker mit einem Gain von 8 kann mit einer Eingangsspannung von 0-3 Volt eine Ausgangsspannung von 0-24V angefahren werden.



Schaltung 5: Analoger Spannungsausgang

Minimaler Lastwiderstand

Abbildung 5 zeigt den Ausgangsstrom I_{Out} und die Ausgangsspannung U_{Out} in Abhängigkeit des Lastwiderstands. Der maximale Ausgangsstrom des OPV's beträgt 80mA. In der Simulation ist dieser bei einem Lastwiderstand von 303Ohm erreicht. Per Definition der Aufgabenstellung sollen die Ausgänge maximal 10mA liefern können. Dieser Strom wäre bei einem Lastwiderstand von 2.4kOhm bereits erreicht.

Die Ausgangsspannung bleibt konstant auf 24V, es finden keine Abweichungen in der Ausgangsspannung durch ändern der Last statt.

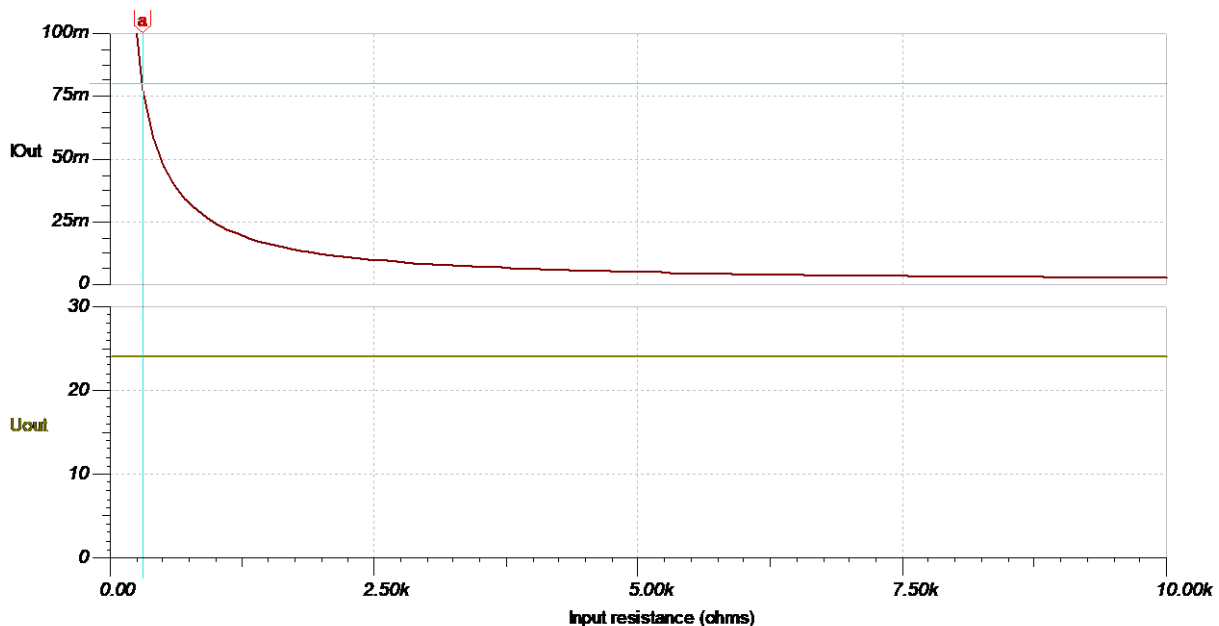


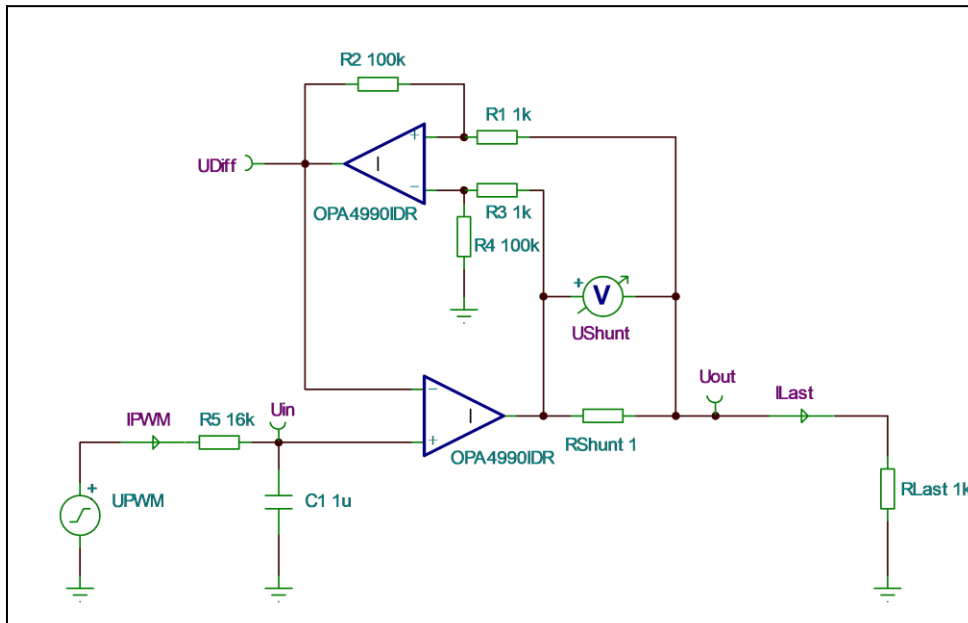
Abbildung 5: Ausgangsstrom in Abhängigkeit des Lastwiderstands

4.5 Analoge Stromausgänge

Mindestens zwei Gleichstromausgänge müssen jeweils 0-20mA liefern können. Der Ausgang ist offen, der Strom fließt also zum GND der zu testenden Platine. Der Shunt-Widerstand muss den Strom somit vor der Last messen. Dadurch kann der Spannungsabfall des Shunts nicht gegenüber GND gemessen werden, sondern muss über einen Differenzverstärker zum eigentlichen Operationsverstärker zurückgeführt werden.

1mA erzeugt am Shunt ein Millivolt Spannungsabfall. Dieser wird mit durch den Differenzverstärker um den Faktor 100 verstärkt. Pro Milliampère müssen am Eingang also 0.1V anliegen.

Achtung: Die unten abgebildete Schaltung funktionierte nur in der Simulation. Die korrigierte Variante ist im Kapitel 8.5 „Analoge Stromausgänge“ abgebildet.



Schaltung 6: Gleichstromausgang

Tabelle 5: Simulationswerte analoge Stromquelle

Signal	Messung Simulation
U_{PWM}	3.3V, 30.3% PWM
U_{in}	1V
U_{Out}	9.95V
U_{Shunt}	10mV
U_{Diff}	1V
I_{Out}	10.13mA
I_{Last}	9.94mA

Der Operationsverstärker regelt den Ausgangstrom so, dass über dem Shunt-Widerstand exakt 10mV abfallen. Jedoch fließen über die Widerstände R1-R4 kleine Ströme ab, weshalb der Ausgangstrom von den gewünschten 10mA abweicht. Die Grösse der Abweichung ist abhängig vom Lastwiderstand sowie vom gewünschten Laststrom, da dieser das Potential U_{Diff} verändert. Die Abweichung ist jedoch gering und für die Anwendung vernachlässigbar.

4.6 Hochstromausgänge

Der Prüfsimulator muss zwei hohe Wechselströme ein- und ausschalten können, um das Vorhandensein einer Last simulieren zu können. Pro Ausgang muss mindestens 1 Ampère Wechselstrom mit einer Frequenz von 50Hz ein- und ausgeschaltet werden können.

Spannungsgesteuerte Stromquelle

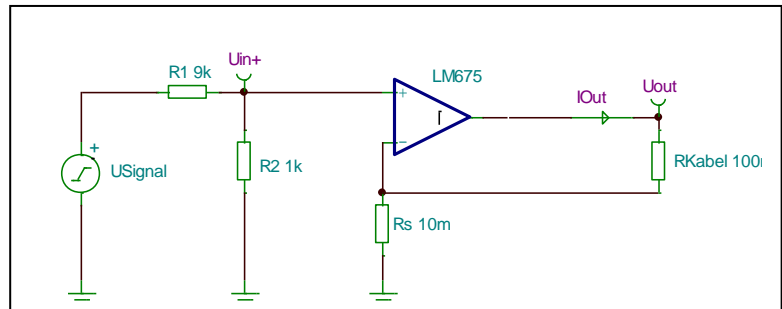
Der erste Lösungsansatz war das Ansteuern eines Leistungsoperationsverstärkers. Der LM675 kann am Ausgang bis zu 3A liefern. Die Idee war gemäss Schaltung 4 eine spannungsabhängige Stromquelle zu evaluieren. Nach einem ersten Versuchsaufbau wurde schnell klar, dass die Schaltung so nicht funktionieren kann.

Der Strom I_{Out} muss sowohl positiv als auch negativ sein können, um einen Wechselstrom simulieren zu können. Mit einem Sinussignal am Eingang wird der Ausgangstrom zwar sinusförmig, jedoch mit einem Offset. Um das Problem zu lösen wären folgende zwei Varianten denkbar:

1) Den Shunt-Widerstand an eine Referenzspannung anschliessen. Dadurch wären sowohl positive als auch negative Ströme möglich. Nachteil: Nicht nur der OPV, sondern auch die Referenzspannungsquelle müssten die hohen Ströme aushalten.

2) VSS vom Operationsverstärker mit einer negativen Spannung speisen. Nachteil: Es müsste eine zusätzliche Spannungsquelle mit einer negativen Spannung relativ zu GND realisiert werden.

Beide Lösungen bedeuten einen grossen Mehraufwand. Um alternative Lösungsansätze zu finden wurde das Gespräch mit Christian Walser gesucht. Von ihm kam der Vorschlag für das Verwenden der firmeninternen Strompumpen.



Schaltung 8: Spannungsabhängige Stromquelle mit OPV

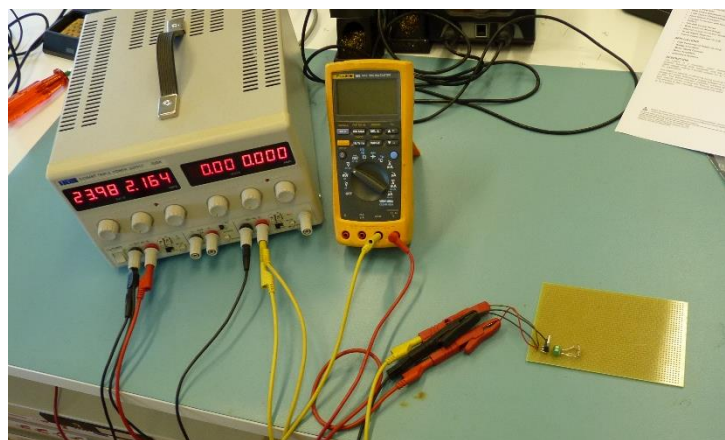


Abbildung 6: Versuchsaufbau gemäss Schaltung 4

Strompumpe

Die Condair Group AG besitzt zwei Strompumpen um hohe Lastströme simulieren zu können. Die Anforderung an den Prüfsimulator ist einzig das Ein- und Ausschalten der hohen Ströme. Das Steuern der Stromstärke, wie es mit einer spannungsgesteuerten Stromquelle möglich gewesen wäre, ist optional.

Einfachheitshalber wurde entschieden, die Strompumpe für die Simulation der grossen Last zu verwenden. Die beiden Anschlüsse der Strompumpe werden am Prüfsimulator gemäss Schaltung 9 angeschlossen. Über zwei Relay kann der Stromfluss für die beiden Ausgänge 1A,1B und 2A,2B unterbrochen werden.

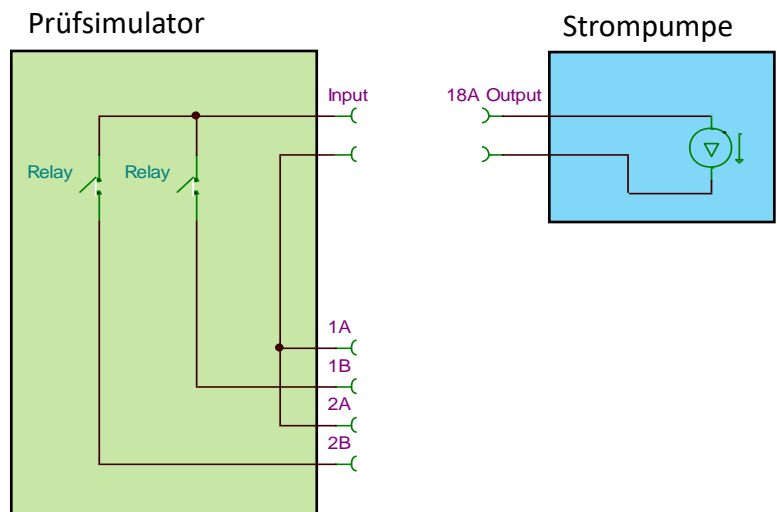


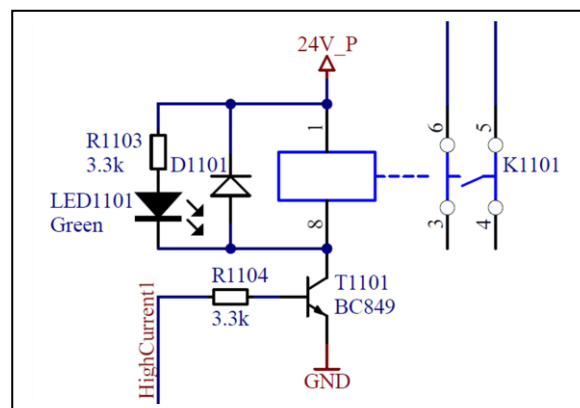
Abbildung 7: Prizip Hochstromausgänge

Relay-Typ

Das ausgewählte Relay vom Typ G2RL-1A-CV-HA kann Lasten von bis zu 16A schalten. Diese hohe Schaltkapazität ist notwendig um die grossen Ströme ein- und ausschalten zu können. Über einen NPN-Transistor kann das Relay direkt vom Mikrocontroller ein und ausgeschaltet werden. Eine Freilaufdiode schützt den Transistor vor den Spannungsspitzen, die beim Entladen der Spule entstehen.

Tabelle 6: Relay G2RL-1A-CV-HA Parameter

Parameter	
Schaltstrom max.	16A
Schaltspannung max.	250VAC
Spulenspannung	24VDC
Spulenwiderstand	360Ohm
Kontaktkonfiguration	Schliesser

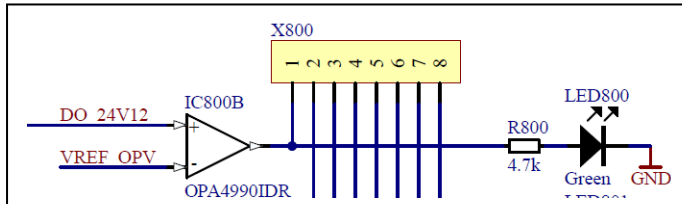


Schaltung 9: Hochstrom-Relay Beschaltung

Schaltung 10: Hochstrom-Relay

4.7 24VDC Ausgänge

Die 24VDC Ausgänge müssen die CMOS Level des Mikrocontrollers in 0 und 24V umwandeln. Da für die analogen Ausgänge bereits ein leistungsstarker rail-to-rail Operationsverstärker eingesetzt wird, wurde dieser auch direkt als Levelshifter von 3.3V auf 24V Pegel verwendet. Über einen Spannungsteiler wird eine Referenzspannung von 1.65V erzeugt und an den negativen Eingängen der Operationsverstärker eingesetzt. Am Ausgang wird zusätzlich eine LED mit Vorwiderstand angeschlossen, um den Ausgangszustand zu signalisieren.



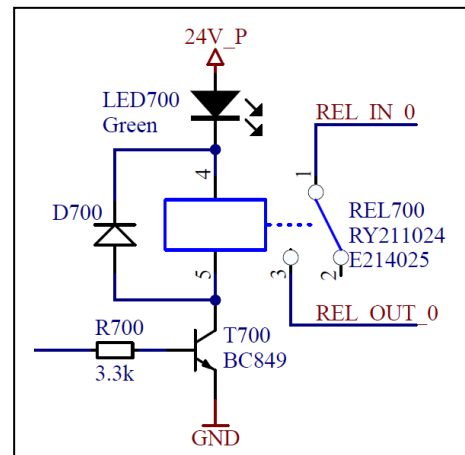
Schaltung 12: 24VDC Ausgang

4.8 Relay Ausgänge

Die Relay Ausgänge werden benötigt, um 230V Signale ein- und auszuschalten. Der gewählte Typ ist ein kompaktes Print-Relay, welches 250VAC bei einer maximalen Stromstärke von 8A schalten kann. Um den Zustand des Ausgangs anzuzeigen, wird eine LED in Serie zur Relay-Spule geschaltet. Dies ist möglich, da die Relay-Spule den Strom auf etwa 10mA begrenzt und die Spule minimal 16.8V für das Schalten benötigt.

Tabelle 7: Relay RY211024 Parameter

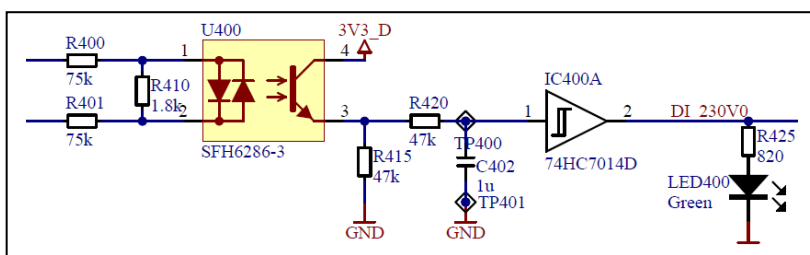
Parameter	
Schaltstrom max.	8A
Schaltspannung max.	250VAC
Spulenspannung	24VDC
Spulenspannung min.	16.8VDC
Spulenwiderstand	2350Ohm
Kontaktkonfiguration	Schliesser



Schaltung 11: Relay Ausgang

4.9 230VAC Eingänge

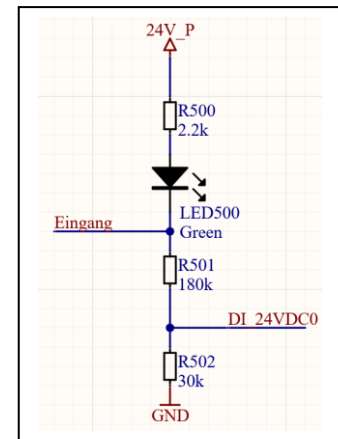
Die Schaltung für die 230VAC Eingänge wurde vom RS-Gerät übernommen. Über einen Optokoppler wird mithilfe von zwei entgegengerichteten Dioden ein Phototransistor geschaltet. Dieser schaltet ein 3.3V-Signal, welches durch einen Tiefpassfilter an einen Schmitt-Trigger angeschlossen ist. Am Ausgang ergeben sich dann saubere 3.3V Pegel. Über eine LED wird der Eingangszustand signalisiert.



Schaltung 13: 230VAC Eingang

4.10 24VDC Eingänge

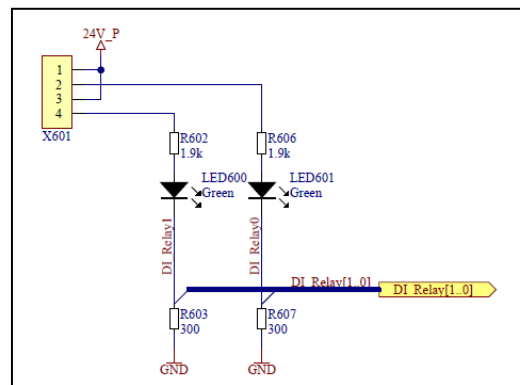
Die 24VDC Eingänge müssen den 24V Pegel selbst bereitstellen, da die meisten 24V Ausgänge der zu prüfenden Geräte als Open Collector Schaltungen realisiert sind. Ist der Eingang auf 24V oder hochohmig, liegen am Ausgang (in der Schaltung DI_24VDC0) 3V an. Schaltet der Eingang auf 0V, dann fließt ein genügend hoher Strom, dass die LED leuchtet. Am Ausgang ist das Spannungspotential dann ebenfalls 0V.



Schaltung 14: 24VDC Eingang

4.11 Relay Eingänge

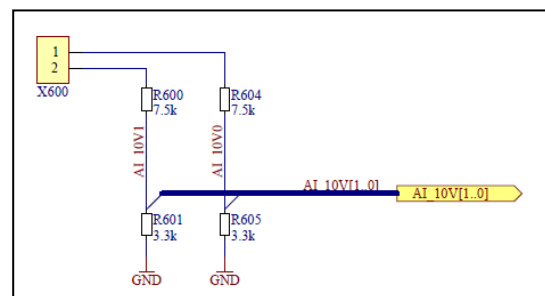
Einige Geräte besitzen ein Relay, welches als potentialfreier Schalter anderen Leiterplatten oder Systemen einen Zustand signalisieren kann. Das zu testende Relay wird mit 24V beschaltet. Ist das Relay eingeschaltet, leuchtet die LED und am Ausgang liegen 3V an.



Schaltung 15: Beide Relay Eingänge

4.12 Analoge Eingänge

Die analogen Eingänge können Spannungspegel von 0 bis 10V erreichen. Über einen Spannungsteiler werden die Pegel um den Faktor 3.3 geteilt. Die resultierenden Signale werden vom Mikrocontroller mithilfe eines AD-Wandlers eingelesen.



Schaltung 16: Beide analog Eingänge

4.13 Mikrocontroller

Mikrocontroller der Serie STM32F3 von STMicroelectronics verfügen über einen leistungsstarken 32-bit ARM Cortex M4 mit einem Digital Signal Processor und einer Floating Point Unit. Der Typ STM32F303 wird als Performance oder auch Allrounder Modell angegeben. Da die Mikrocontroller von STMicroelectronics bei den Produkten der Condair Group AG sehr verbreitet sind und ein Mikrocontroller vom Typ STM32F303 bereits im Projekt „Niveauprüfvorrichtung“ eingesetzt wurde, fiel die Wahl des Mikrocontrollers auf dieses Modell.

Da der Mikrocontroller durch die grosse Anzahl an Ein- und Ausgängen viele Pins benötigt, musste das grösstmögliche Modell mit der Artikelnummer STM32F303ZD mit 144 Pins verwendet werden.

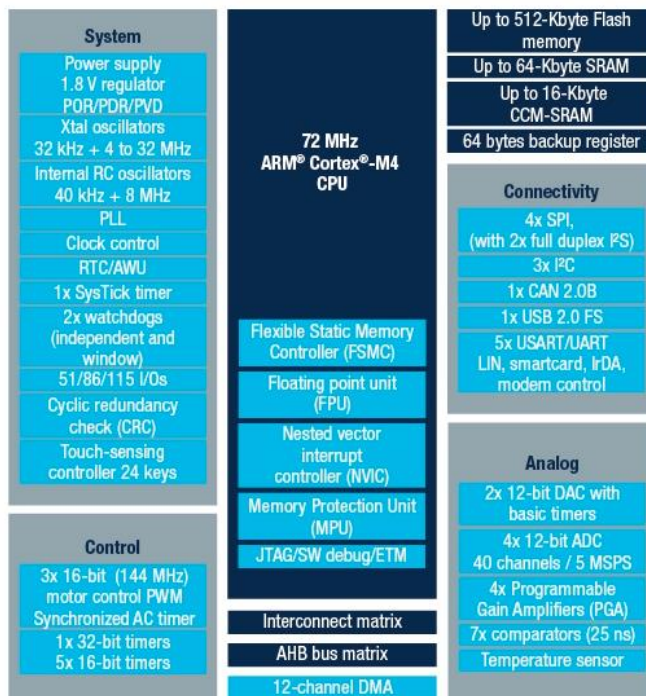


Abbildung 8: STM32F303ZD Blockschaubild (STMicroelectronics, 2020)

4.14 RS-485 Transceiver

Modbus ist ein serielles Kommunikationsprotokoll, welches eine RS-485 Schnittstelle als physikalisches Übertragungsmedium verwendet. Damit der Prüfsimulator über Modbus gesteuert werden kann, muss eine RS-485 Schnittstelle mit 5V Pegeln bereitgestellt werden.

Der SN65HVD3085E von Texas Instruments ist ein RS-485 Transceiver. Er wurde bereits in verschiedenen firmeninternen Geräten für die Umwandlung von UART-Schnittstellen mit 3.3V Pegeln zu RS-485 Kommunikationsleitungen mit 5V Pegeln verwendet.

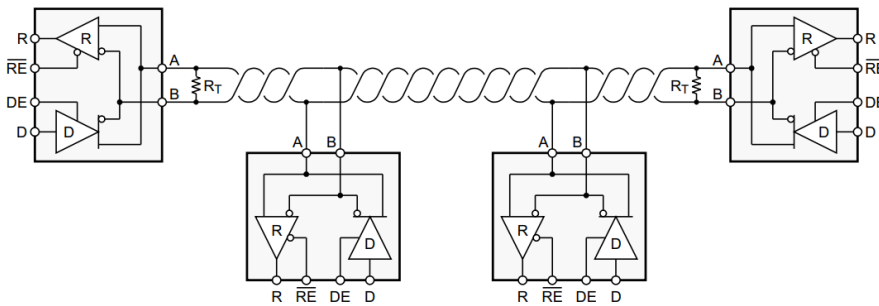


Abbildung 9: Prinzip des Transceivers (Texas Instruments, 2020)

4.15 Digitales Potentiometer

Die zu prüfenden Geräte messen die Temperatur mithilfe eines PT1000 oder PT100 Messwiderstands. Um den Widerstandswert zu bestimmen, erzeugen die Geräte einen konstanten Stromfluss von 250uA und messen den Spannungsabfall über dem Messwiderstand.

Erste Überlegungen, einen Transistor anzusteuern und damit den gewünschten Widerstandswert zu simulieren, erschien als zu aufwendig. Nach einer Recherche im Internet wurde ein IC gefunden, welches als „Digitales Potentiometer“ beworben wird.

Das digitale Potentiometer kann über eine „UP/Down“ Auswahl und einen Inkrement-Eingang gesteuert werden. Ein interner Zähler in Kombination mit einem Decoder wählt von 100 Wippen immer genau einen aus, welcher als Zwischenabgriff des Potentiometers agiert.

Das Potentiometer besitzt einen Gesamtwiderstand von 1kOhm, daraus ergibt sich eine Auflösung von 10.10Ohm pro Zehlschritt.

$$R_{\text{Schritt}} = \frac{1k\Omega}{99 \text{ Widerstände}} = 10.10\Omega$$

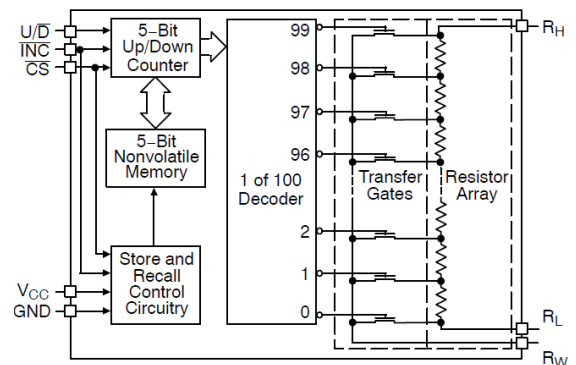


Abbildung 10: Digitales Potentiometer Prinzip (ON Semiconductor, 2020)

5 Layout

5.1 Eigenschaften

Leiterplatte Prüfsimulator	
Länge	250mm
Breite	140mm
Dicke	1.6mm
Anzahl Lagen	2
Kupferdicke	35um
Bestückungsdruck	Weiss, Top Layer
Leiterbahnbreite	$\geq 0.3\text{mm}$
Bohrungsdurchmesser	$\geq 0.3\text{mm}$

5.2 Polygone

Die Speisungen wurden durch Polygone realisiert. Da sich auf dem Top Layer viel mehr Leiterbahnen befinden, wurde das grossflächige GND-Polygon auf dem Top-Layer realisiert. Auf dem Bottom Layer wurde die Fläche in 3 Polygone aufgeteilt. Im Zentrum ein 3.3V_D Polygon für die Speisung des Mikrocontrollers. Im Bereich der analogen Ausgänge ein 24V_A Polygon. Die restliche Fläche ist mit einem 24V_D Polygon versehen (Grau markiert). An den Stellen, wo 230VAC vorhanden sind, wurde das Polygon nicht gezeichnet, damit der genormte Abstand zum Kleinspannungsbereich bestehen bleibt.

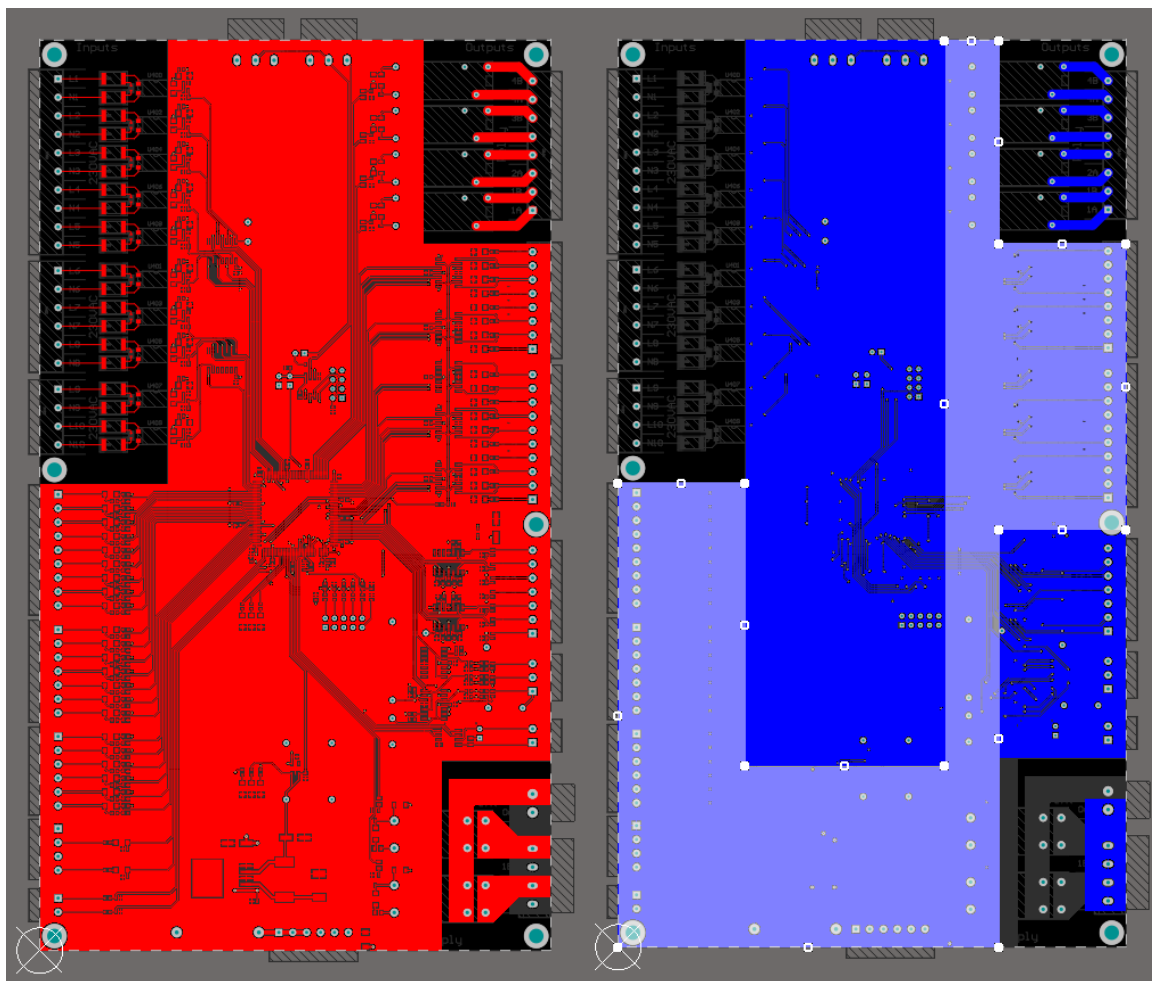


Abbildung 11: Top Layer (rot) und Bottom Layer (blau)

5.3 Pin Mapping

Damit sich möglichst wenig Leiterbahnen überkreuzen, wurde die Pinbelegung des Mikrocontrollers für die Ein- und Ausgänge genau studiert und geplant. Die Pinbelegungen sind in den nachfolgenden Tabellen definiert.

Wichtig: Die Pinnummerierungen im Schema sowie in der Software beginnen immer beim Index 0! Auf der Leiterplatte beginnt die Beschriftung der Stecker bei 1!

Tabelle 8: Pin Mapping digitale Eingänge

Digitale Eingänge	
Eingang	Pin
DI_230V0	PC7
DI_230V1	PC8
DI_230V2	PC9
DI_230V3	PA11
DI_230V4	PA12
DI_230V5	PH2
DI_230V6	PC10
DI_230V7	PC11
DI_230V8	PC12
DI_230V9	PD0
DI_24V0	PD1
DI_24V1	PD2
DI_24V2	PD3
DI_24V3	PD4
DI_24V4	PD5
DI_24V5	PD6
DI_24V6	PD7
DI_24V7	PG9
DI_24V8	PG10
DI_24V9	PG11
DI_24V10	PG12
DI_24V11	PG13
DI_24V12	PG14
DI_24V13	PG15
DI_24V14	PB4
DI_24V15	PB5
DI_24V16	PB6
DI_24V17	PB7
DI_24V18	PB8
DI_24V19	PB9
DI_24V20	PE0
DI_24V21	PE1
DI_Relay0	PE2
DI_Relay1	PE3

Tabelle 9: Pin Mapping digitale Ausgänge

Digitale Ausgänge	
Ausgang	Pin
DO_Relay0	PD8
DO_Relay1	PD9
DO_Relay2	PD10
DO_Relay3	PD11
DO_24V0	PF13
DO_24V1	PF11
DO_24V2	PF12
DO_24V3	PF14
DO_24V4	PG1
DO_24V5	PF15
DO_24V6	PG0
DO_24V7	PE11
DO_24V8	PE12
DO_24V9	PE13
DO_24V10	PB10
DO_24V11	PE14
DO_24V12	PE15
DO_24V13	PB11
DO_24V14	PB14
DO_24V15	PB12
DO_24V16	PB13
DO_24V17	PB15
DO_HighCurrent0	PF5
DO_HighCurrent1	PF4

Tabelle 10: Pin Mapping PWM-Ausgänge

PWM Ausgänge			
PWM Ausgang	Pin	Timer	Kanal
PWM_Voltage0	PC1	Timer 1	Kanal 2
PWM_Voltage1	PC2	Timer 1	Kanal 3
PWM_Voltage2	PA2	Timer 2	Kanal 3
PWM_Voltage3	PA0	Timer 2	Kanal 1
PWM_Voltage4	PA1	Timer 2	Kanal 2
PWM_Voltage5	PA3	Timer 2	Kanal 4
PWM_Voltage6	PA4	Timer 3	Kanal 2
PWM_Current0	PF10	Timer 15	Kanal 2
PWM_Current1	PF9	Timer 15	Kanal 1
PWM_Current2	PC0	Timer 1	Kanal 1

Tabelle 11: Pin Mapping analoge Eingänge

Analoge Eingänge			
Analoger Eingang	Pin	AD-Wandler	Kanal
AI_10V0	PE9	ADC3	2
AI_10V1	PE10	ADC3	14
AI_Voltage0	PC4	ADC2	5
AI_Voltage1	PC5	ADC2	11
AI_Voltage2	PB0	ADC3	12
AI_Voltage3	PB1	ADC3	1
AI_Voltage4	PB2	ADC2	12
AI_Current0	PA6	ADC2	3
AI_Current1	PA5	ADC2	2
AI_Current2	PA7	ADC2	4

5.4 Stecker Beschriftungen

Der Bestückungsplan ist nachfolgend abgebildet. Die Beschriftungen der Stecker sind vergrössert dargestellt, damit sie erkenntlich sind. Der Bestückungsplan ist im Anhang im A3 Format vorzufinden, damit die restlichen Beschriftungen ebenfalls ersichtlich werden.

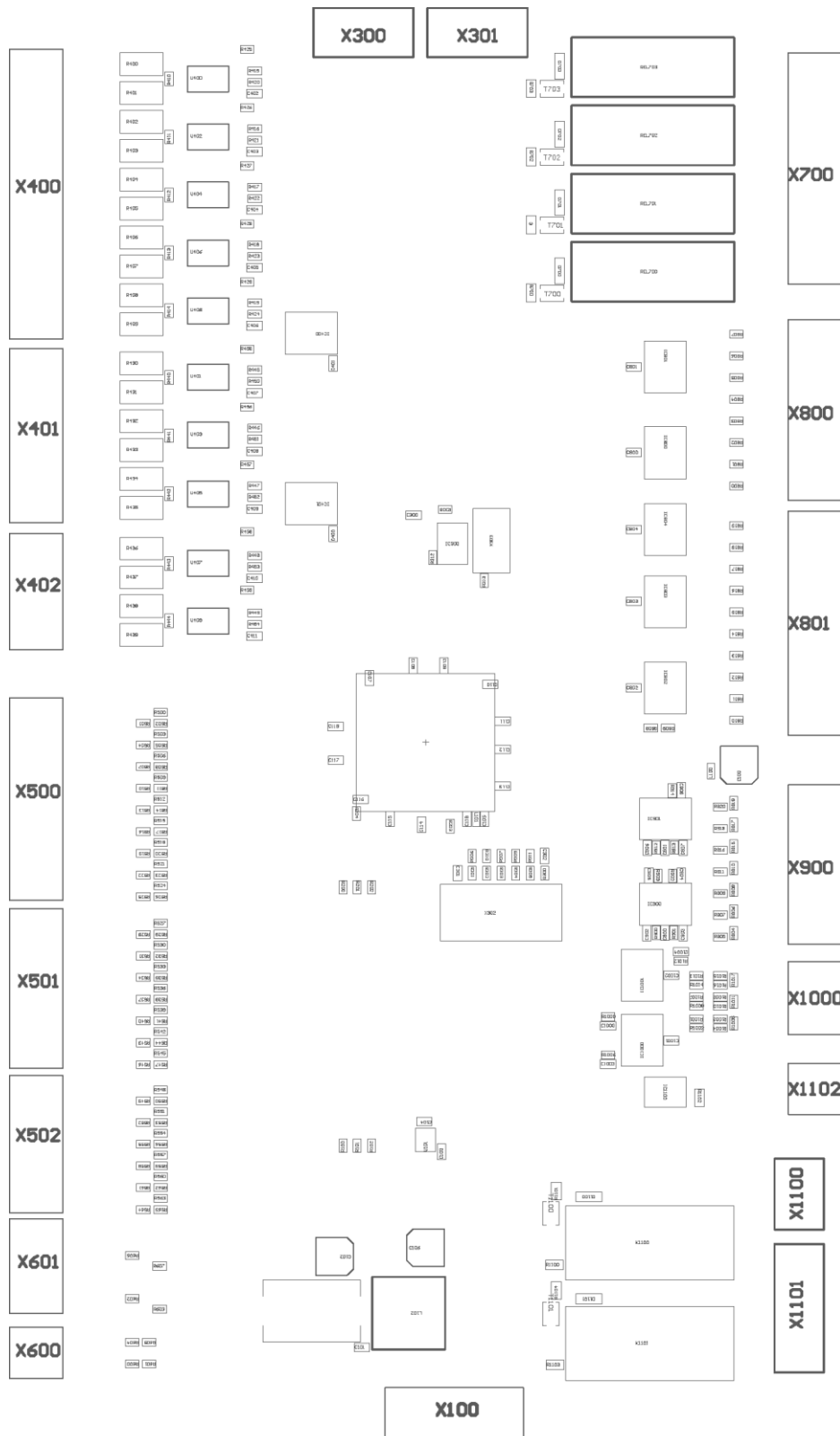


Abbildung 12: Stecker Beschriftungen

6 Bestückung

Am 30.04.2020 wurde die Leiterplatte bestückt. Da das Bestücken nicht als Teil der IPA geplant war, wurde dieser Arbeitstag nicht in die IPA eingerechnet. Für die Bestückung wurde die mitbestellte Schablone verwendet. Die SMD-Pads wurden mit Lötpaste bestrichen und die etwas mehr als 400 Komponenten mithilfe des Heissluftföns bestückt. Danach konnten alle THT-Komponenten gelötet und die Lötstellen des Mikrocontrollers mithilfe eines Mikroskops ausgebessert werden.

Beim Bestücken wurde festgestellt, dass ein Fehler in der Layout-Bibliothek vorhanden war. Die aus der generierten Stückliste bestellten LED's waren kleiner als der Footprint. Von Hand konnten die LED's dennoch bestückt werden.

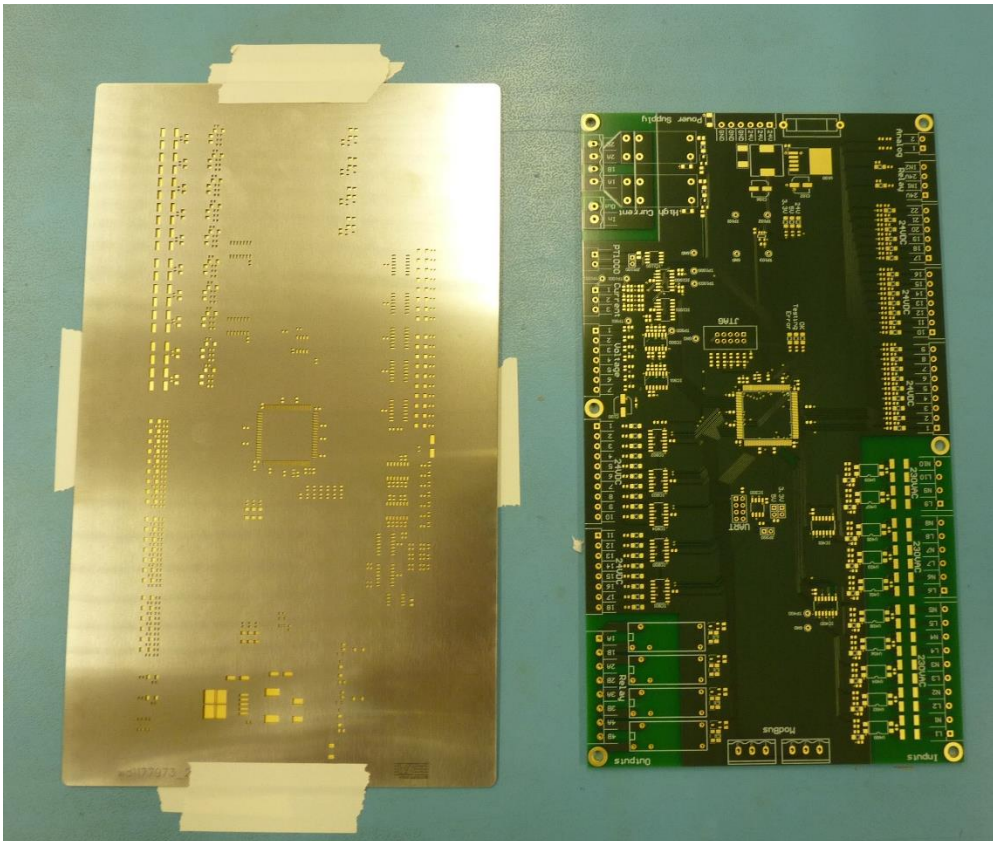


Abbildung 13: Lötstichabklatsch

7 Embedded-Software

7.1 Konzept

Das Software Konzept zeigt die Architektur der verschiedenen Softwaremodule auf. Die Software lässt sich in 3 Layer aufteilen:

Hardware Abstraction Layer

Der unterste Layer dient als Hardware Abstraktion. STMicroelectronics bietet mit der HAL-Library eine grosse Unterstützung für das Verwenden der mikrocontrollerspezifischen Ressourcen wie ADC, Timer, Kommunikationsschnittstellen etc.

Drivers

Der mittlere Layer „Drivers“ trennt die Applikation von der vorhandenen Hardware. Die verschiedenen Ein- und Ausgänge werden in Module verpackt. Über Funktionen kann mit der Nummer des Ein-/Ausgangs (siehe Layout) der jeweilige Zustand des Eingangs eingelesen oder der Zustand des Ausgangs gesetzt werden.

Application

Die Applikation kommuniziert über UART oder Modbus mit der PC-Software. Sie führt Befehle aus und gibt Meldungen über die Zustände der Eingänge zurück. Die Embedded-Software arbeitet mit dem von Keil zur Verfügung gestellten Betriebssystem RTX5. Die Applikation wird in Threads aufgeteilt. Benötigt werden Threads fürs Kommunizieren (Console und Modbus Modul), ein Thread für das Ausführen von Befehlen (Command Executer Modul), sowie Threads für das Überprüfen der Eingänge (Input Event Generator Modul) und falls nötig Threads für das Regeln der analogen Ausgänge (Analog Output Regulator Modul)

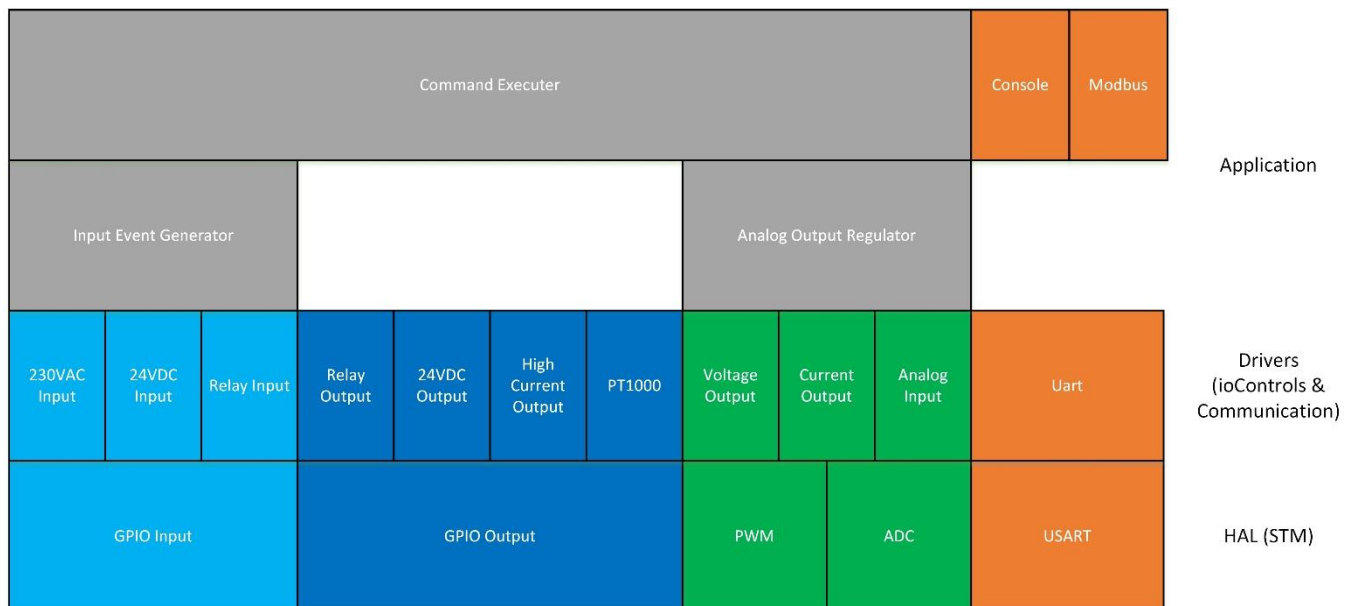


Abbildung 14: Software Konzept

7.2 Implementation

Durch die zeitliche Begrenzung wurden im Rahmen der IPA nur die unteren beiden Layer programmiert, damit die Hardware sinngemäss getestet werden kann. In diesem Abschnitt werden die Funktionen der einzelnen Module grob erklärt. Für eine detaillierte Analyse der Software muss der Code mit den dazugehörigen Kommentaren analysiert werden (siehe Anhang).

7.3 Main

In der Main Datei werden aktuell beinahe alle Module importiert, da gewisse Tests direkt im Main programmiert wurden. Später dient das Main nur noch dem Starten des Betriebssystems und dem Initialisieren der Module mithilfe der Startup Datei.

7.4 Startup

Alle Module besitzen eine Initialisierungsfunktion. Das Modul „Startup“ initialisiert die verwendeten Module in der richtigen Reihenfolge, sodass ein korrektes Aufstarten der Software ermöglicht wird. Das Modul stellt zwei Funktionen zur Verfügung. Die Funktion `startup_SetupHardware()` initialisiert alle Hardwaretreiber. Darunter fallen folgende Module: Clock, Timers, ADC und UART. Die Funktion `startup_SetupIOControls()` initialisiert alle Module, welche für die Ansteuerung der Ein- und Ausgänge des Prüfsimulators benötigt werden.

7.5 Definitions

Die Headerdatei „Definitions“ enthält Typendefinitionen für die IOControls Module. Sie dient als Schnittstelle zwischen dem Application Layer und dem Drivers Layer. Aktuell ist nur eine Typendefinition implementiert, nämlich der `ioState_t`, welcher den Zustand eines Eingangs oder Ausgangs definiert. Mögliche Zustände sind: ON, OFF und undefiniert.

7.6 Digitale Eingänge

Die drei Module „Input230VAC“, „Input24VDC“ und „InputRelay“ sind in ihrem Aufbau gleich. Mithilfe von Definitionen wird jedem Eingang der dazugehörige Mikrocontroller Pin sowie Port zugeordnet. Die Pin- und Portdefinitionen werden zusätzlich in einem Array abgelegt. Dadurch kann der gewünschte Eingang ganz einfach über einen Indexzugriff im Array eingelesen werden. Über `Modulnamen_GetInput(inputNumber)` kann jeder Eingang von der Applikation eingelesen werden.

7.7 Digitale Ausgänge

Die drei Module „OutputRelay“, „Output24VDC“ und „OutputHighCurrent“ sind in ihrem Aufbau gleich. Mithilfe von Definitionen wird jedem Ausgang der dazugehörige Mikrocontroller Pin sowie Port zugeordnet. Die Pin- und Portdefinitionen werden zusätzlich in einem Array abgelegt. Dadurch kann der gewünschte Ausgang ganz einfach über einen Indexzugriff im Array angesteuert werden. Über `Modulnamen_SetOutput(outputNumber, ioState)` kann jeder Ausgang von der Applikation auf On / Off gesetzt werden.

7.8 Analoge Eingänge

Das Modul „AnalogInput“ stellt die Funktion `AnalogVoltage_GetInput(inputNumber)` zur Verfügung. Die Funktion `ADC_GetValues(buffer)` des ADC Moduls wird aufgerufen, um eine AD-Wandlung zu triggern. Mithilfe der Referenzspannung von 3.3V und dem Spannungsteilverhältnis wird die Spannung am analogen Eingang berechnet. Diese wird als float Wert zurückgegeben.

7.9 Analoge Spannungsausgänge

Das Modul „OutputVoltage“ initialisiert alle benötigten PWM-Pins für die analogen Spannungsausgänge als „Alternative Function Push-Pull“. Mithilfe des „Timers“ Modul werden die benötigten Timer-Kanäle für die PWM-Erzeugung aktiviert.

Über die Funktion `OutputVoltage_SetDutycycle(outputNumber, dutycycle)` kann der Dutycycle eines Ausgangs gesetzt werden. Über die Funktion `OutputVoltage_SetVoltage(outputNumber, voltage)` kann direkt die gewünschte Ausgangsspannung eines Ausgangs gesetzt werden. Beide Funktionen passen über das „Timers“ Modul den Dutycycle des PWM-Signals an, die `SetVoltage` Funktion berechnet den benötigten Dutycycle anhand der als Parameter übergebenen Spannung.

7.10 Analoge Stromausgänge

Das Modul „OutputCurrent“ initialisiert alle benötigten PWM-Pins für die analogen Stromausgänge als „Alternative Function Push-Pull“. Mithilfe des „Timers“ Modul werden die benötigten Timer-Kanäle für die PWM-Erzeugung aktiviert.

Über die Funktion `OutputCurrent_SetDutycycle(outputNumber, dutycycle)` kann der Dutycycle eines Ausgangs gesetzt werden. Über die Funktion `OutputCurrent_SetCurrent(outputNumber, current)` kann direkt die gewünschte Stromstärke eines Ausgangs gesetzt werden. Beide Funktionen passen über das „Timers“ Modul den Dutycycle des PWM-Signals an, die `SetCurrent` Funktion berechnet den benötigten Dutycycle anhand der als Parameter übergebenen Stromstärke.

7.11 Clock

Das „Clock“ Modul initialisiert das Clock Managment des Mikrocontrollers und aktiviert alle benötigten clocks für die Hardware Ressourcen. Zusätzlich wird der Timer 4 initialisiert. Dieser wird benötigt, um die „HAL_Tick“ Funktion mit einer Frequenz von 1kHz aufzurufen. Der HAL_Tick wird von allen HAL-Treibern verwendet, um Timeouts generieren zu können. Normalerweise läuft das automatisch über den SysTick ab. Dieser wird aber vom Betriebssystem RTOS_V2 verwendet, deswegen muss die Funktion „HAL_Tick“ über eine Timer Interrupt Routine ausgeführt werden.

7.12 Timers

Das „Timers“ Modul initialisiert alle benötigten Timer für die PWM-Erzeugung. Timer 1, Timer 2, Timer 3 und Timer 15 werden durch einen Prescaler von 7 und einer Periodendauer von 1000 mit einer Frequenz von 10.29kHz getaktet.

$$\frac{72MHz}{7 * 1000} \approx 10.2857kHz$$

Über die Funktionen `Timers_StartPWM(timer, channel)` und `Timers_StopPWM(timer, channel)` kann die PWM-Erzeugung einzelner Timer-Kanäle ein- und ausgeschaltet werden. Über die Funktion `Timers_SetCRR(timer, channel)` kann das Capture Compare Register eines Timer-Kanals angepasst und somit der Dutycycle des daraus resultierenden PWM-Signals verändert werden.

7.13 ADC

Das „ADC“ Modul initialisiert alle benötigten AD-Wandler mit den dazugehörigen Kanälen. Die aktuelle Software verwendet nur die beiden analogen 10V Eingänge. Die Rückführungen der analogen Ausgänge werden noch nicht verarbeitet. Dadurch werden aktuell nur die beiden Kanäle 2 und 14 des ADC3 initialisiert.

Da die AD-Wandler mehrere Kanäle messen sollen, ist ein DMA Controller zwingend nötig. Dieser wird ebenfalls im ADC Modul initialisiert.

7.14 UART

Das „UART“ Modul initialisiert die USART1 Ressource des Mikrocontrollers. Die Kommunikationsschnittstelle wird folgendermassen konfiguriert:

Tabelle 12: UART Konfiguration

UART Konfiguration	
Baudrate	115200
Stopbits	1
Parity bit	None
UART Mode	Full Duplex

Die Funktion `UART_Send(msg, len)` sendet die übergebene Nachricht mithilfe der UART-Schnittstelle an den angeschlossenen Empfänger. Für das Empfangen von Daten kann mit der Funktion `UART_SetRxCallback(callback)` ein Callback Pointer gesetzt werden. Ein Interrupt wird ausgelöst, sobald ein Zeichen über die UART-Schnittstelle empfangen wird. Die Callback Funktion wird aufgerufen und das empfangene Zeichen sowie das Status Register der UART Ressource werden weitergeleitet.

8 Messungen

Die wichtigsten Angaben und Charakteristiken des Prüfsimulators wurden in Messberichten erfasst. Diese Messberichte sind nachfolgend eingerahmt abgedruckt und sind deswegen nicht im Anhang vorzufinden.

8.1 Versorgungsspannungen

Name	Markus Lacher	Datum	06.05.2020
Messobjekt	Speisespannungen Prüfsimulator		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157)		
Schaltung	Siehe Schema „Power Supply“		

Versuchsbeschreibung

Der Prüfsimulator wird mit 24VDC gespeisen. Auf dem Print werden folgende Spannungen erzeugt:

- 24V Digital
- 5V Digital
- 3.3V Digital
- 24V Analog
- 3.3V Analog

Die Versorgungsspannungen sollen geprüft werden. Die Strombelastung der gesamten Leiterplatte liegt bei 257mA, alle Ausgänge waren eingeschaltet.

Ergebnis

Messpunkt	Erwartete Spannung	Gemessene Spannung	Abweichung	%
Eingangsspannung	-	24.00V	-	-
24V Digital	24.00V	23.98V	-0.02V	-0.083%
5V Digital	5.00V	5.09V	+0.09V	+1.800%
3.3V Digital	3.30V	3.30V	0.00V	+0.000%
24V Analog	24.00V	23.97V	-0.03V	-0.125%
3.3V Analog	3.30V	3.30V	0.00V	+0.000%

Alle Speisungen bleiben bei Änderungen der Last konstant. Die Abweichungen sind in einem guten Bereich, einzig der 5V Schaltregler sticht etwas heraus.

Ort	Datum	Gezeichnet
Pfäffikon SZ	06.05.2020	M. Lacher

8.2 Maximale Strombelastung

Name	Markus Lacher	Datum	07.05.2020
Messobjekt	Maximale Strombelastung Prüfsimulator		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157)		
Schaltung	Siehe Schema Prüfsimulator		

Versuchsbeschreibung

Die maximale Strombelastung des Prüfsimulators soll gemessen werden. Dafür werden alle Ausgänge eingeschaltet. Die 24V Ausgänge, sowohl digital als auch analog, dürfen nach Definition mit maximal 10mA belastet werden. Diese 10mA pro Ausgang werden dazugerechnet. Pro Eingangstyp wird mindestens ein Eingang eingeschaltet. Die Änderung in der Strombelastung wird auf alle gleichen Eingangstypen hochgerechnet.

Ergebnis

Messung	Strom
Leiterplatte mit Software	28mA
Ausgänge eingeschaltet	473mA
Eingänge eingeschaltet	249mA
Total	750mA

Ort
Pfäffikon SZ

Datum
07.05.2020

Gezeichnet
M. Lacher

8.3 24V Ausgänge

Name	Markus Lacher	Datum	06.05.2020
Messobjekt	24V digitale Ausgänge		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157) TDS 2014C Digital Storage Osc (SN. C030763)		
Schaltung	Siehe Schema „24VDC Output“		

Versuchsbeschreibung

Alle 18 24VDC Ausgänge werden auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft. Zusätzlich wird vom Ausgang 1 (DO_24V0 im Schema) die Ausgangsspannung abhängig zur Last, Flankensteilheit und Verzögerungszeit untersucht.

Die Last wird mit einem 10kOhm Potentiometer angepasst. Die Speisespannung der Leiterplatte wird auf exakt 24.00V eingestellt.

Ergebnis

Alle 18 Ausgänge funktionieren einwandfrei. Der Spannungsabfall des Rail-to-Rail OPV's liegt bei weniger als 0.5V.

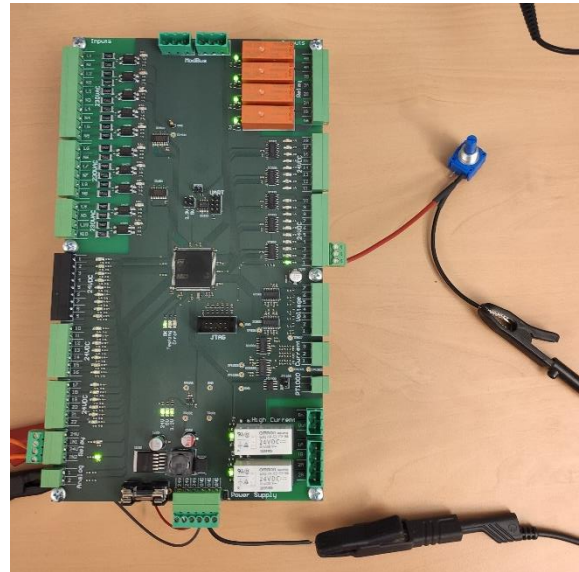


Abbildung 15: Versuchsaufbau 24VDC Ausgänge

Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Last

Tabelle 13: Messpunkte der 24VDC Ausgänge in Abhängigkeit zur Last

R_{Last} [kOhm]	U_{out} [V]
10	23.821
9	23.815
8	23.807
7	23.798
6	23.785
5	23.767
4	23.741
3	23.697
2	23.608
1	23.313
0.5	22.597

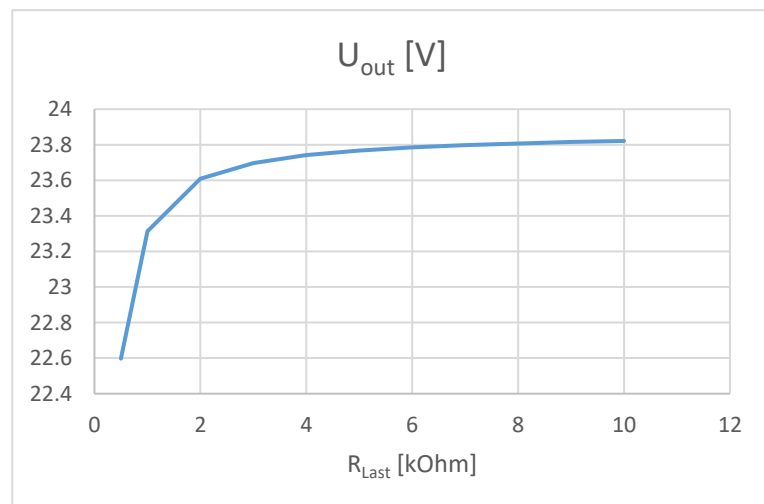


Abbildung 16: 24VDC Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Last

Der Spannungsabfall steigt bei kleiner werdenden Lasten exponentiell an. Beim als Maximum definierten Laststrom von 10mA beträgt die Ausgangsspannung noch über 23.6V. Das entspricht einer Abweichung von -1.67% gegenüber der Speisespannung.

Flankensteilheit

Die Flankensteilheit wurde bei einem Lastwiderstand von 10kOhm gemessen. Bei einem Zustandswechsel des Ausgangs steigt die Flanke linear an. Die Anstiegszeit beträgt sowohl beim Anstieg als auch beim Absinken 5.8µs.

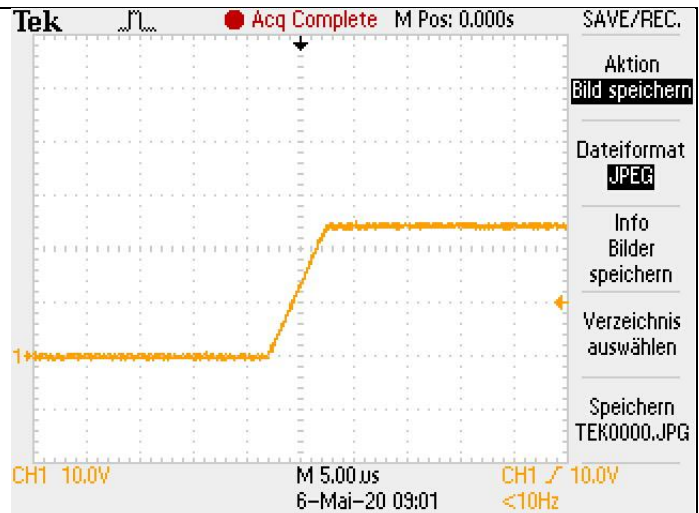


Abbildung 17: Anstiegsdauer 24VDC Ausgang

Verzögerungszeit

Die Verzögerungszeit wurde bei einem Lastwiderstand von 10kOhm gemessen. Der Ausgang des OPV's beginnt nach ca. 400ns anzusteigen. Beim Absinken beträgt die Verzögerung ca. 420ns.

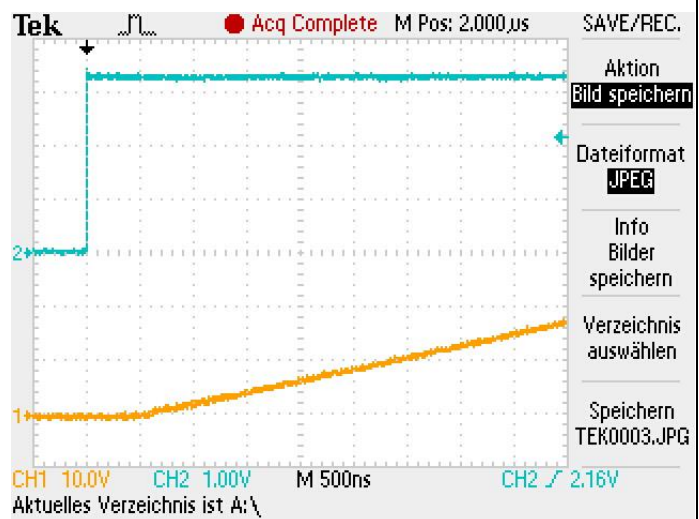


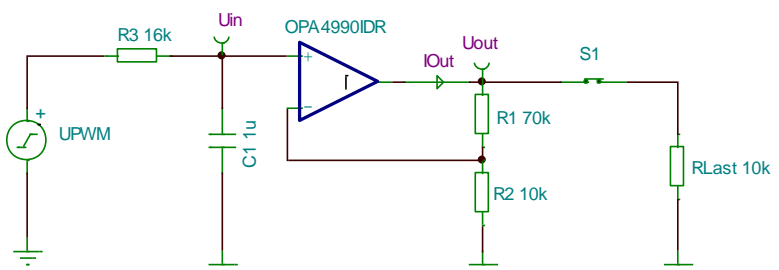
Abbildung 18: Verzögerungszeit 24VDC Ausgang

Ort
Pfäffikon SZ

Datum
06.05.2020

Gezeichnet
M. Lacher

8.4 Analoge Spannungsausgänge

Name	Markus Lacher	Datum	06.05.2020
Messobjekt	Analoge Spannungsausgänge Prüfsimulator		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157)		
Schaltung			

Versuchsbeschreibung

Alle 7 analogen Spannungsausgänge werden auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft. Zusätzlich **soll** vom Ausgang 1 (AO_Voltage0) die Spannungsrange, Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Last, Anstiegszeit und der Output Noise gemessen werden. Alle nachfolgenden Messungen werden, wenn nicht anders erwähnt, mit einer Eingangsspannung von 24.00V und einem Lastwiderstand von 10kOhm durchgeführt. Die Ausgangsspannung wird am Punkt U_{out} gemessen.

Ergebnis

Alle Ausgänge mit Ausnahme von Nummer 4 funktionieren. Das PWM-Signal von Nummer 4 ist nicht vorhanden.

Massnahme: Fehlersuche in der Software.

Ursache: Kanal 1 von Timer 2 wird nicht initialisiert. Nach einer Anpassung in der Software funktionieren nun alle analogen Spannungsausgänge.

Spannungsrange

U_{min} : 0.014V
 U_{max} : 23.975V
 Range: 23.961V

Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Last

Die Ausgangsspannung wurde auf 10V eingestellt, die Last variiert zwischen 1kOhm und 10kOhm. Die Ausgangsspannung bleibt über den ganzen Messbereich konstant. Der Operationsverstärker regelt die Änderung ideal aus.

Tabelle 14: Messpunkte der analogen Spannungsausgänge in Abhängigkeit zur Last

R_{Last} [kOhm]	U_{out} [V]
10	10.000
9	10.002
8	9.999
7	10.000
6	10.001
5	10.001
4	10.000
3	9.998
2	10.001
1	10.001

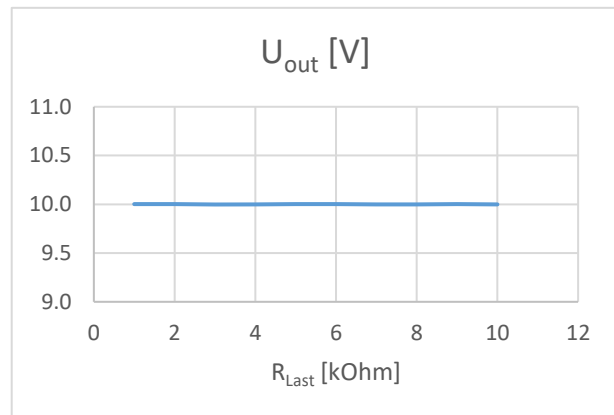


Abbildung 19: Kennlinie Ausgangsspannung Last

Anstiegszeit

Die Anstiegszeit wurde von der Minimalspannung bis zur Maximalspannung gemessen. Die aufgezeichnete Anstiegsdauer beträgt 40ms.

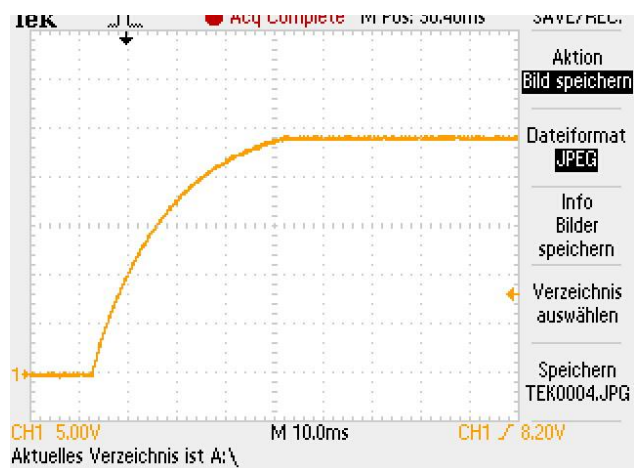


Abbildung 20: Anstiegszeit analoge Spannungsausgänge

Output Noise

Um den Output Noise zu messen, wurde eine Ausgangsspannung von 10V eingestellt. Der Ripple beträgt etwa 100mVpp. Die Periodendauer ist etwas weniger als 100μs, was die PWM-Frequenz von 10.29kHz widerspiegelt.

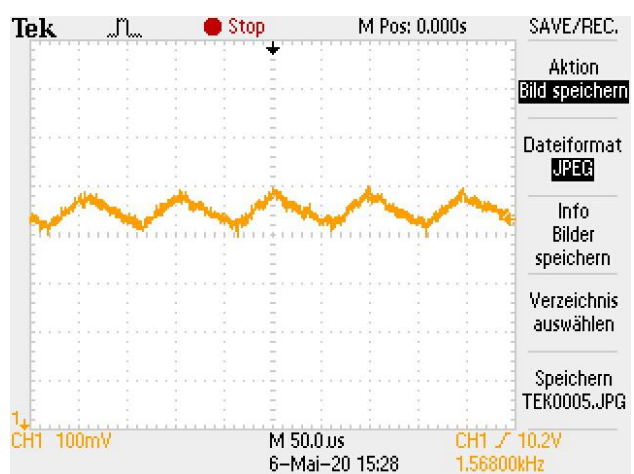


Abbildung 21: Output Noise analoge Spannungsausgänge

Ort
Pfäffikon SZ

Datum
06.05.2020

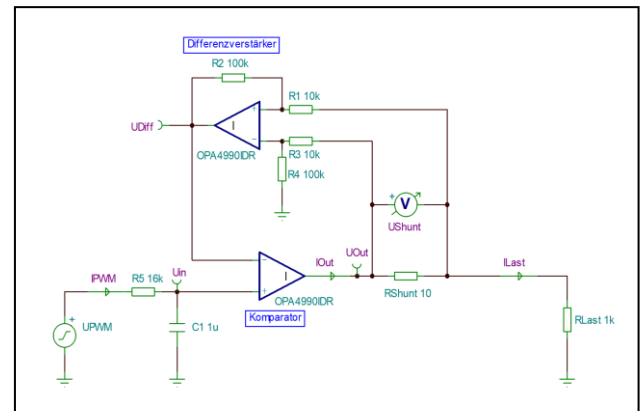
Gezeichnet
M. Lacher

8.5 Analoge Stromausgänge

Die analogen Stromausgänge funktionierten bei den ersten Testversuchen nicht. Es wurde festgestellt, dass bei einigen Operationsverstärkern im Schema die positiven mit den negativen Eingängen vertauscht wurden. In der Simulation sind die Eingänge jedoch richtig.

Zusätzlich wurde folgendes Problem festgestellt: Die Widerstandsverhältnisse der Differenzverstärker wurden so gewählt, dass bei ordentlichem Betrieb von 0-30mA eine Ausgangsspannung von 0-3V erzeugt wird. Diese Ausgänge werden direkt zu diversen Mikrocontroller Pins geführt. Bei fehlerhaftem Verhalten der Schaltung könnte an den Pins bis zu 24V anliegen.

Die Fehler wurden direkt am IC korrigiert und die Ausgänge nochmals getestet. Die Ausgänge funktionierten immer noch nicht, aber die Operationsverstärker wurden heiss. Die Versorgungsspannung wurde sofort unterbrochen, ohne weitere Messungen durchzuführen. Es wurde befürchtet, dass am Ausgang des Differenzverstärkers tatsächlich eine zu hohe Spannung anliegt, welche über den Mikrocontroller abfliesst. Aus Sicherheitsgründen wurden die beiden Operationsverstärker ausgelötet, damit weitere Tests durchgeführt werden konnten, ohne den Mikrocontroller zu gefährden.



Schaltung 17: Analoge Stromquelle

Fehlersuche

Um den Fehler zu finden wurde die Schaltung gemäss Abbildung auf einer kleinen Testplatine realisiert. Hier bestätigte sich der Verdacht, dass am Ausgang des Differenzverstärkers und somit auch am negativen Eingang des Komparators 24V anliegen. Am positiven Eingang des Komparators können maximal 3.3V anliegen, gegeben durch den Mikrocontroller. Somit ist der Ausgang des Komparators auf 0V geschaltet.

Vermutung der Ursache: Geht man davon aus, dass die Ausgangsspannungen kurz nach Einschalten der Operationsverstärker auf 0V liegen, reicht eine kleine positive Spannungsdifferenz an den Eingängen des Differenzverstärkers, dass die Ausgangsspannung ansteigt. Der Ausgang des Komparators liefert immer noch 0V. Der Strom beginnt vom Ausgang des Differenzverstärkers über den Spannungsteiler und den Shunt-Widerstand zum niederen Potential zu fließen, also zum Ausgang des Komparators. Durch den Spannungsteiler liegt am positiven Eingang des Differenzverstärkers nun eine noch grössere Spannungsdifferenz gegenüber dem negativen Eingang an. Der Ausgang des Differenzverstärkers steigt also weiter an und erreicht somit das Maximum von 24V. Bis die Software endlich beginnt am positiven Eingang des Komparators eine Spannung anzulegen, liegen am negativen Eingang schon lange 24V an, der Komparator bleibt immer auf 0V, somit fliesst kein Strom.

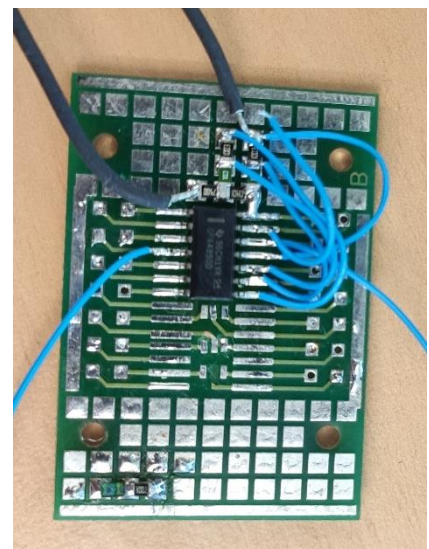


Abbildung 22: Tesplatine analoge Stromausgänge

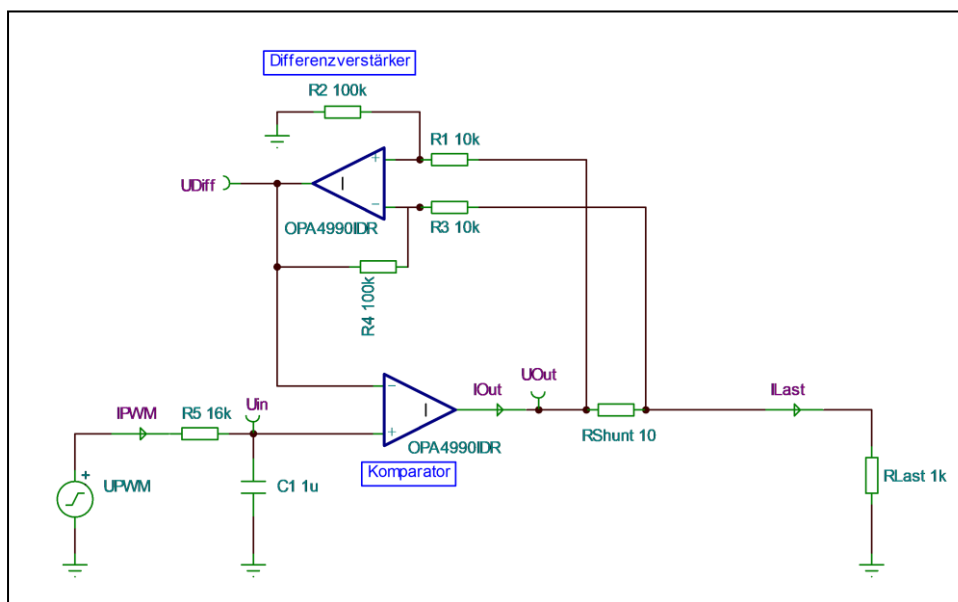
Lösungsansätze

Lösungsansätze zu finden gestaltete sich relativ schwierig. Die Schaltung funktionierte in der Simulation mit idealen Operationsverstärkern, aber mit realen Operationsverstärkern war dies nicht der Fall. Komplexe Lösungsansätze und neue Schaltungen mussten zu Beginn auch wieder simuliert werden, bevor die Bauteile bestellt und ein Testaufbau realisiert werden konnte. Also wurde nach einfachen Lösungen für das Problem gesucht. Als Unterstützung wurde das Gespräch mit Roman Schläpfer gesucht. Er bestätigte die Überlegungen zur Ursache, hatte jedoch keine Lösungsansätze bereit.

Der Strom darf nicht vom Ausgang des Differenzverstärkers zum Ausgang des Komparators fließen. Eine Diode in Serie zum Spannungsteiler R1, R2 schied als Stromblocker aus, da der Spannungsabfall in Vorwärtsrichtung der Diode die Messung über dem Shunt-Widerstand verfälschen würde. Alternativ dazu würde ein Impedanzwandler als Spannungsfolger infrage kommen.

Mit einem Spannungsfolger würde das Problem des zurückfließenden Stroms durch den Shunt-Widerstand zwar verhindert werden, das Problem bleibt aber weiterhin bestehen. Denn wenn der Spannungsfolger zu Beginn auch 0V am Ausgang liefert, fließt der Strom immer noch vom Ausgang des Differenzverstärkers über R1 und R2 zum Ausgang des Spannungsfolgers und die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers würde wieder auf 24V ansteigen.

Nach all diesen Überlegungen kam dann die entscheidende Idee: Der Differenzverstärker schaukelt sich hoch, da die Rückführung des Ausgangs auf den positiven Eingang des Operationsverstärkers geschaltet ist. Würde die Rückführung auf den negativen Eingang geführt werden, führt ein Ansteigen des Ausgangs zu einer grösseren Spannung am negativen Eingang und somit würde das Hochschaukeln verhindert werden. Da die Rückführung somit vertauscht wird, müssen auch die beiden Anschlüsse am Shunt-Widerstand getauscht werden, damit die Messung funktioniert. Zusätzlich wurde der Shunt-Widerstand 10mal grösser dimensioniert, damit der Verstärkungsfaktor des Differenzverstärkers 10mal kleiner gemacht werden kann. Diese Massnahme resultiert in einem besseren Signal- zu Rauschverhältnis.



Schaltung 18: Analoge Stromausgänge, korrigierte Version

Name	Markus Lacher	Datum	08.05.2020
Messobjekt	Analoge Stromausgänge Prüfsimulator		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157) Fluke 289 TRMS (SN. 24720116)		
Schaltung	Siehe analoge Stromausgänge, korrigierte Version		

Versuchsbeschreibung

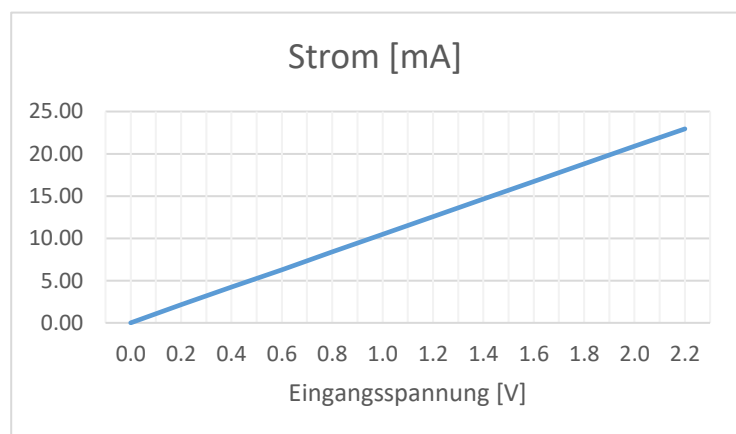
Die analoge Stromquelle soll mithilfe der Testplatine analysiert werden. Der Ausgangsstrom in Abhängigkeit zur Eingangsspannung und die Stromänderung in Abhängigkeit zur Laständerung sollen aufgezeichnet werden.

Für das Aufzeichnen der Spannungs-Stromkennlinie wird als Lastwiderstand 1kOhm angeschlossen. Für das Aufzeichnen der Stromänderung in Abhängigkeit zur Last wird als Lastwiderstand ein Potentiometer verwendet. Die Eingangsspannung wird so eingestellt, dass bei einer Last von 1kOhm 10mA fließen. Danach kann durch Ändern des Potentiometerwiderstands die Abweichung des Stromes aufgezeichnet werden.

Spannungs-Stromkennlinie

Die Spannungs-Stromkennlinie verläuft nahezu perfekt linear. Das Spannungs-Stromverhältnis beträgt 10.432 und weicht damit etwas vom geplanten Faktor 10 ab.

Eingangsspannung [V]	Ausgangsstrom [mA]
0.0	0.00
0.2	2.15
0.4	4.23
0.6	6.29
0.8	8.38
1.0	10.49
1.2	12.56
1.4	14.64
1.6	16.73
1.8	18.80
2.0	20.88
2.2	22.95

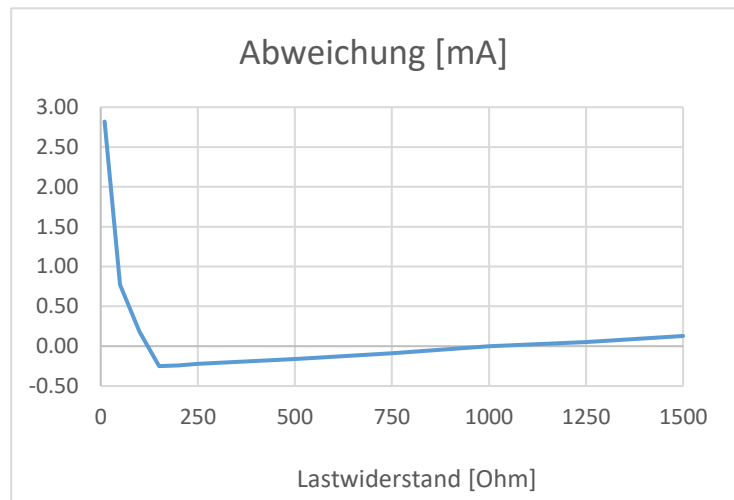


$$I(U) = \frac{I_A}{U_e} = \frac{22.95mA}{2.2V} = 10.432 \frac{mA}{V}$$

Lastkennlinie

Die Lastkennlinie steigt im Bereich von 200 bis 1500 Ohm linear an, die Abweichung ist sehr gering und daher vernachlässigbar. Warum die Stromstärke bei Widerstandswerten unter 200 Ohm rasant ansteigt ist noch ungeklärt.

Last [Ohm]	Strom [mA]	Abweichung [mA]
10	12.82	2.82
50	10.77	0.77
100	10.18	0.18
150	9.75	-0.25
200	9.76	-0.24
250	9.78	-0.22
500	9.84	-0.16
750	9.91	-0.09
1000	10.00	0.00
1250	10.05	0.05
1500	10.13	0.13



Ort
Pfäffikon SZ

Datum
08.05.2020

Gezeichnet
M. Lacher

8.6 Digitales Potentiometer

Name	Markus Lacher	Datum	08.05.2020
Messobjekt	Digitales Potentiometer Prüfsimulator		
Messmittel	EX354RT Triple Power Supply (SN. 396264) Fluke 289 TRMS (SN. 30810157) Fluke 289 TRMS (SN. 24720116)		
Schaltung	Siehe Schema „Digital Potentiometer“		

Versuchsbeschreibung

Der Widerstand des Potentiometers soll in Abhängigkeit zur eingestellten Anzahl Ticks gemessen werden. Zusätzlich soll der Gesamtwiderstand ausgemessen werden (RH zu RL). Für das Ausmessen wird das Potentiometer mit einer konstanten Stromstärke von 1mA belastet. Mithilfe des gemessenen Spannungsabfalls wird der Widerstand ermittelt.

Ergebnis

Ticks	Spannung [V]	Widerstand [kOhm]
0	0.272	0.272
10	0.372	0.372
20	0.469	0.469
30	0.576	0.576
40	0.674	0.674
50	0.789	0.789
60	0.895	0.895
70	1.005	1.005
80	1.11	1.11
90	1.225	1.225
100	1.32	1.32



Der Widerstand steigt linear an. Unerwartet ist der Offset von ca. 270 Ohm. Ein kurzer Blick ins Datenblatt zeigt: Der «Whipper», welcher den Zwischenabgriff des Potentiometers kontaktiert, besitzt einen Widerstand von 400 – 1000 Ohm, abhängig von der Speisespannung und der Belastung. Warum der Widerstand darunter liegt, bleibt ungewiss.

Der Gesamtwiderstand von Anschluss RH zu RL beträgt 1.056kOhm.

Ort	Datum	Gezeichnet
Pfäffikon SZ	08.05.2020	M. Lacher

9 Terminplanabgleich

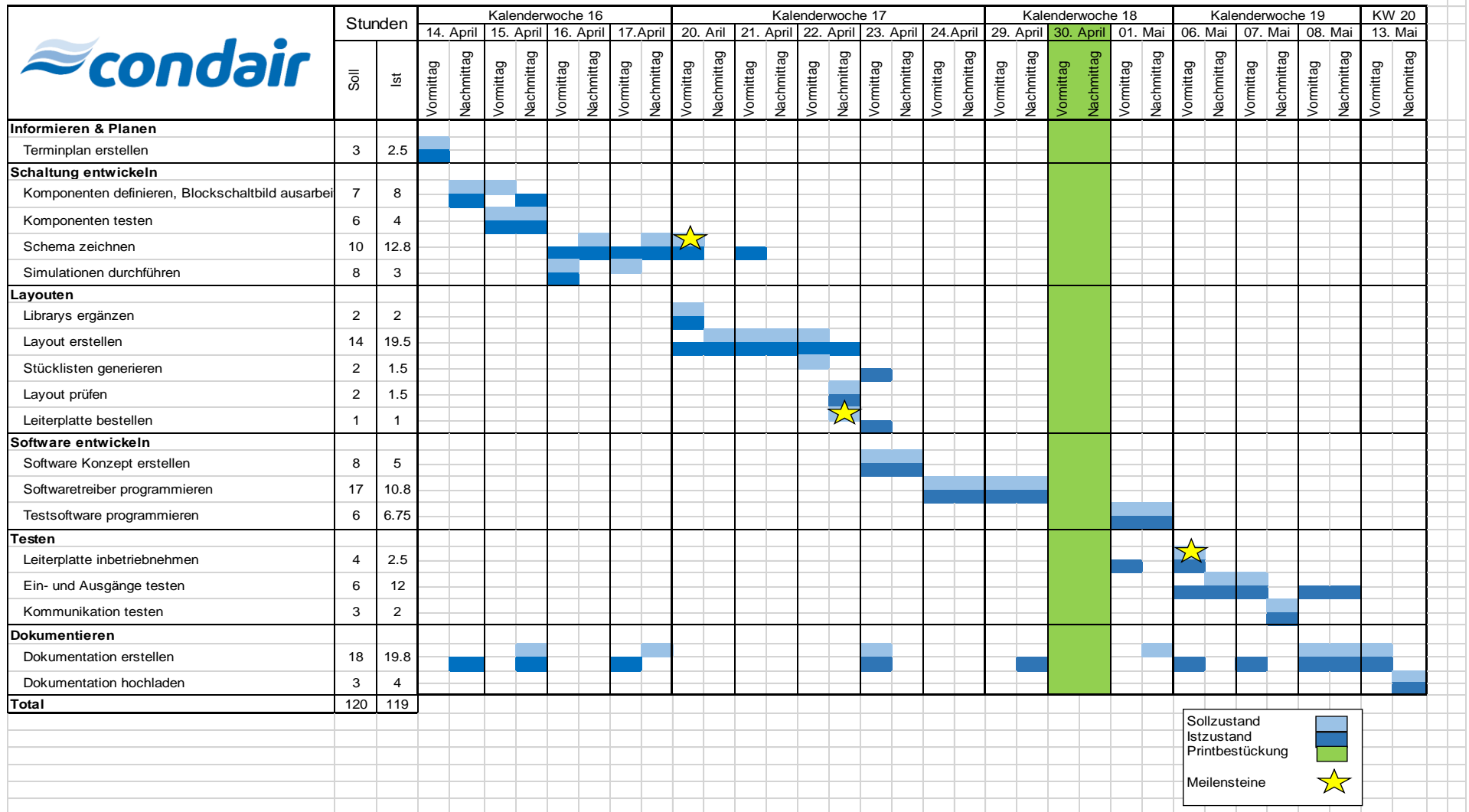


Abbildung 23: Zeitplan V1.05

10 Zielerreichung und Fortsetzung

Sowohl der zeitliche Rahmen als auch die Anforderungen an den Prüfsimulator konnten eingehalten werden. Im Projektverlauf gab es keine grossen Abweichungen zum Zeitplan. Jedoch haben gewisse Arbeiten wie das Erstellen des Layouts oder das Testen der Ein- und Ausgänge deutlich mehr Zeit als geplant in Anspruch genommen. Diese Zeit konnte vor allem in der Softwareentwicklung kompensiert werden, da das Programmieren der Treiber viel weniger Aufwand bedeutete als zu Beginn angenommen.

Alle Anforderungen an die Hardware konnten erfüllt werden. Einzig die analogen Stromausgänge müssen auf der Leiterplatte noch geändert werden.

Folgende Punkte müssen im weiteren Projektverlauf noch umgesetzt werden:

- Korrektur der analogen Stromausgänge auf der Leiterplatte durchführen.
- Analoge Ein- und Ausgänge kalibrieren, damit eine sehr präzise Ansteuerung ermöglicht wird. Dafür können die Messberichte verwendet werden. Zusätzlich sollen die Rückführungen der analogen Ausgänge eingelesen und verarbeitet werden, damit die analogen Ausgänge mithilfe von Regelungstechnik exakt gesteuert werden können.
- Modbus in Betrieb nehmen, Kommunikationsprotokoll für das Steuern des Prüfsimulators definieren.
- Embedded Software fertigstellen. Dafür muss der Applikationslayer programmiert werden, sodass die gesendeten Befehle ausgeführt werden und bei Änderungen an den Eingängen des Prüfsimulators eine Meldung an die PC-Software gesendet wird.
- PC-Software entwickeln. Dafür muss zuerst ein Konzept erstellt werden, in welcher Form die Testprotokolle definiert werden. Danach muss die Software programmiert und getestet werden.

11 Quellenverzeichnis

ON Semiconductor. (15. 04 2020). CAT5113. Von <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/CAT5113-D.PDF> abgerufen

STMicroelectronics. (29. 02 2020). Von https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f3-series/stm32f303/stm32f303zd.html abgerufen

Texas Instruments. (04. 05 2020). *Datenblatt*. Von <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd3085e.pdf?ts=1588599981703> abgerufen

12 Anhang

Die Nachfolgenden Dokumente sind in derselben Reihenfolge im Anhang angefügt:

Tabelle 15: Anhang

Dokument	Version
Arbeitsjournale	-
Blockschaltbild	V1.02
Schema	V1.01
Bestückungsplan	V1.00
Stückliste	V1.00
Software	Stand 13.05.2020