

Bachelorarbeit

Robin Erasmus

Entwicklung einer Lüftersteuerung für hochzuverlässige
vibrationssensitive Anwendungen mit
Mikrocontroller-Ansteuerung

Robin Erasmus

Entwicklung einer Lüftersteuerung für hochzuverlässige vibrationssensitive Anwendungen mit Mikrocontroller-Ansteuerung

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Robert Heß
Zweitgutachter: Prof. Dr. Karl-Ragnar Riemschneider

Eingereicht am: 19.03.2025

Robin Erasmus

Thema der Arbeit

Entwicklung einer Lüftersteuerung für hochzuverlässige vibrationssensitive Anwendungen mit Mikrocontroller-Ansteuerung

Stichworte

DESY, Teilchenbeschleuniger, Kühlung, Lüfter, Drehzahlregelung

Kurzzusammenfassung

Zur Kühlung von elektronischen Komponenten, die für die Steuerung des Beschleunigerbetriebs bei DESY verwendet werden, kommen geregelte Lüfter zum Einsatz. Das bestehende System zur Lüftersteuerung weist jedoch verschiedene Nachteile auf. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Schwachstellen zu analysieren und ein optimiertes System zu entwickeln. Dazu wurden ein neues Konzept und ein Schaltplan entworfen sowie ein Prototyp realisiert. Tests zeigten, dass das neue System insbesondere im oberen Drehzahlbereich eine präzisere Regelung ermöglicht. Zudem konnte ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Lüftercharakteristik, Versorgungsspannung und Regeleigenschaften der unterschiedlichen Fan Speed Controller gewonnen werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen lassen sich gezielt weitere Anpassungen zur Stabilisierung der Regelung ableiten.

Robin Erasmus

Title of Thesis

Development of a microcontroller-driven Fan-Control-System for highly reliable vibration sensitive applications

Keywords

DESY, Particle Accelerators, Cooling, Fans, Rotation Speed Control

Abstract

Controlled fans are used to cool electronic components for controlling accelerator operation at DESY. However, the existing fan control system has various disadvantages. The aim of this work is to analyze these weak points and to develop an optimized system. For this purpose, a new concept and a circuit diagram were designed and a prototype realized. Tests showed that the new system enables more precise control, particularly in the upper speed range. In addition, a better understanding of the relationships between fan characteristics, supply voltage and control properties of the different fan speed controllers was gained. Based on these findings, further targeted adjustments can be made to stabilize the control.

Danksagung

Ich bedanke mich beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY und der Gruppe Maschine Strahlkontrollen (MSK) für die Bereitstellung des Themas für diese Bachelorarbeit, sowie eines Arbeitsplatzes und des Materials. Besonderer Dank gilt Hendrik Lippek, der mich über die ganze Zeit hinweg intensiv betreut und unterstützt hat und mir mit ausführlichem Korrekturlesen viele Anregungen zur Verbesserung dieser Arbeit gegeben hat. Außerdem bedanke ich mich bei Stanislav Chystiakov und Michael Fenner, die mir viele Fragen beantwortet, mich bei Problemen unterstützt und mir Rückmeldungen und Hinweise gegeben haben.

Robin Erasmus

Hamburg, 17.03.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Konzept der 19-Zoll-Boxen zum Beschleunigerbetrieb	3
2.2	Funktionsweisen von Fan-Speed Controllern	6
3	Anforderungen	8
3.1	Charakterisierung des Altsystems	8
3.2	Regelung der Lüfterdrehzahl	8
3.3	Überwachung der Stromaufnahme	9
3.4	Schutz der Versorgungsspannung	9
3.5	Retrofit-Anforderungen	10
3.6	Tabellarische Auflistung der Anforderungen	10
4	Design	11
4.1	High level design	11
4.2	Fan-Speed Controller	14
4.3	Lüfterstromversorgung mit EMV-Filter	14
4.4	Stromüberwachung der einzelnen Lüfter	14
4.5	Mikrocontrollerbasiertes Kommunikationsinterface	16
5	Implementierung	17
5.1	Schaltplan	17
5.1.1	Top	18
5.1.2	InputOutput	18
5.1.3	Power_Monitor	24
5.1.4	Fan_Controller	27
5.1.5	Mikrocontroller	30
5.2	Prototyp	33

5.3	Software	36
6	Verifikation	40
6.1	Inbetriebnahme des Prototyps	40
6.2	Test der Drehzahlregelung	43
6.3	Untersuchung der Schwankung bei niedrigen Drehzahlen	52
6.4	Test der Strommessung	63
6.5	Untersuchung des EMV-Filters	66
6.6	Tabellarische Auflistung der Ergebnisse der Verifikation	69
7	Zusammenfassung	70
	Literaturverzeichnis	73
A	Anhang	76
B	Inhalt der CD	83
	Selbstständigkeitserklärung	84

1 Einleitung

Das Deutsche Elektronensynchrotron DESY [7] ist eine Forschungseinrichtung mit über 2900 Beschäftigten und hat Standorte in Hamburg und Zeuthen [11]. Dort werden Beschleunigeranlagen gebaut, betrieben und kontinuierlich weiterentwickelt. Teilchenbeschleuniger sind Anlagen, die elektrisch geladene Teilchen beschleunigen. Dabei wird den Teilchen durch elektrische Felder Energie zugeführt, während durch magnetische Felder die Flugbahn gelenkt wird [6]. Bei DESY werden sowohl Linearbeschleuniger wie der 315 m lange FLASH [9] oder der 3,4 km lange European XFEL [8], als auch Kreisbeschleuniger wie der 2304 m lange PETRA-Ring [10] betrieben, sowie diverse kleinere Beschleunigeranlagen für Forschung und Entwicklung. Anfangs wurden die Beschleuniger bei DESY hauptsächlich verwendet, um Teilchen mit hohen Energien kollidieren zu lassen, um Erkenntnisse über den Aufbau der Materie zu sammeln. Heute liegt der Fokus bei DESY auf der Erzeugung von hochenergetischem Röntgenlicht, welches bei der Ablenkung von beschleunigten Elektronen als Bremsstrahlung abgestrahlt wird und die Untersuchung kleinster Strukturen wie Moleküle oder Kristalle ermöglicht. Das DESY stellt für Forschende und Unternehmen Messplätze zur Verfügung, an denen sie das Röntgenlicht nutzen können, um ihre Proben zu untersuchen.

Um die Beschleunigeranlagen zu betreiben, sind eine Vielzahl hochpräziser elektrischer und optischer Komponenten notwendig. Diese sind hauptsächlich in Schaltschränken installiert. Neben gängigen Industriestandards werden häufig auch am DESY entwickelte Systeme im 19-Zoll-Einschubformat verwendet. Aufgrund der Störempfindlichkeit vieler hochpräziser Anwendungen müssen jegliche elektromagnetischen und mechanischen Störungen so weit wie möglich vermieden werden. Außerdem müssen die Komponenten im Dauerbetrieb über Wochen oder Monate zuverlässig laufen. Der Ausfall einer einzelnen Komponente kann schlimmstenfalls die vollständige Abschaltung des Beschleunigers und die Aussetzung des Forschungsbetriebs zur Folge haben, was mit hohen Kosten verbunden ist.

Die zur Steuerung des Beschleunigers verwendeten Komponenten erzeugen Abwärme und müssen gekühlt werden. Dazu werden Lüftersysteme mit drei Lüftern verwendet, deren Drehzahl geregelt wird. Dabei sollen die Lüfter mit möglichst geringen Drehzahlen betrieben werden und möglichst wenig von der Vorgabe und voneinander abweichen, um Störungen gering zu halten.

Das aktuell verwendete System hat den Nachteil, dass nur einer von drei Lüftern geregelt wird und die anderen mit der gleichen Steuerspannung mitlaufen. So werden Abweichungen nicht individuell ausgeglichen und die Drehzahlen können weit auseinanderliegen. Außerdem besteht die Gefahr, dass ein nicht geregelter Lüfter stehen bleibt, weshalb die Drehzahl höher gewählt werden muss, als gewünscht.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, auf Grundlage des vorhandenen Altsystems ein neues System zur Lüftersteuerung zu entwickeln, welches drei Lüfter individuell regeln kann. Dadurch sollen die Drehzahlen weniger von der Vorgabe und voneinander abweichen und der Betrieb auch im niedrigen Drehzahlbereich sicher möglich sein. Dazu soll ein Konzept und ein Schaltplan des neuen Systems entwickelt werden. Die wesentlichen Bestandteile des Systems sollen als Prototyp umgesetzt werden. Mit diesem sollen die Drehzahlregelung und die weiteren Anforderungen an das System getestet werden.

2 Grundlagen

Die in dieser Arbeit dargestellten Informationen über die Anforderungen beim Beschleunigerbetrieb, das Konzept der 19-Zoll-Boxen und das bestehende System zur Lüftersteuerung stammen aus persönlicher Kommunikation mit den DESY Mitarbeitern Hendrik Lippek, Michael Fenner und Stanislav Chystiakov.

2.1 Konzept der 19-Zoll-Boxen zum Beschleunigerbetrieb

Bei DESY werden viele der Komponenten in 19-Zoll-Einschubboxen eingebaut. Diese sind aufgeteilt in einen Teil zur Spannungsversorgung, einen Housekeeping-Teil zur Steuerung und zum allgemeinen Betrieb der Box und einen Applikationsteil für die spezifische Funktion als Teil der Steuerung des Beschleunigerbetriebs. Zu dem Housekeeping-Teil gehört das FRED (Fuse Relay Board). Dieses wird von der Spannungsversorgung versorgt und kann alle Spannungen der übrigen Bestandteile der Box messen und überwachen, sowie ein- und ausschalten. Außerdem steuert es andere Teile des Housekeepings, wie auch das System zur Lüftersteuerung. Das FRED wird über UART mit 3,3 V CMOS von einem LAN-Adapter angesprochen, über den per Telnet Befehle an das FRED gegeben werden. Es wird der Lantronix XPort verwendet, der als Schnittstelle zwischen serieller Kommunikation und Ethernet fungiert [12]. Der Housekeeping-Teil muss dafür sorgen, dass der Applikationsteil arbeiten kann, unter anderem, indem die Box durch die Lüfter gekühlt wird. Dabei darf der Applikationsteil aber so wenig wie möglich gestört werden. Die Spannungsversorgung ist redundant, mit zwei Netzteilen, damit bei Ausfall eines Netzteils die Box mit dem anderen weiterbetrieben werden kann.

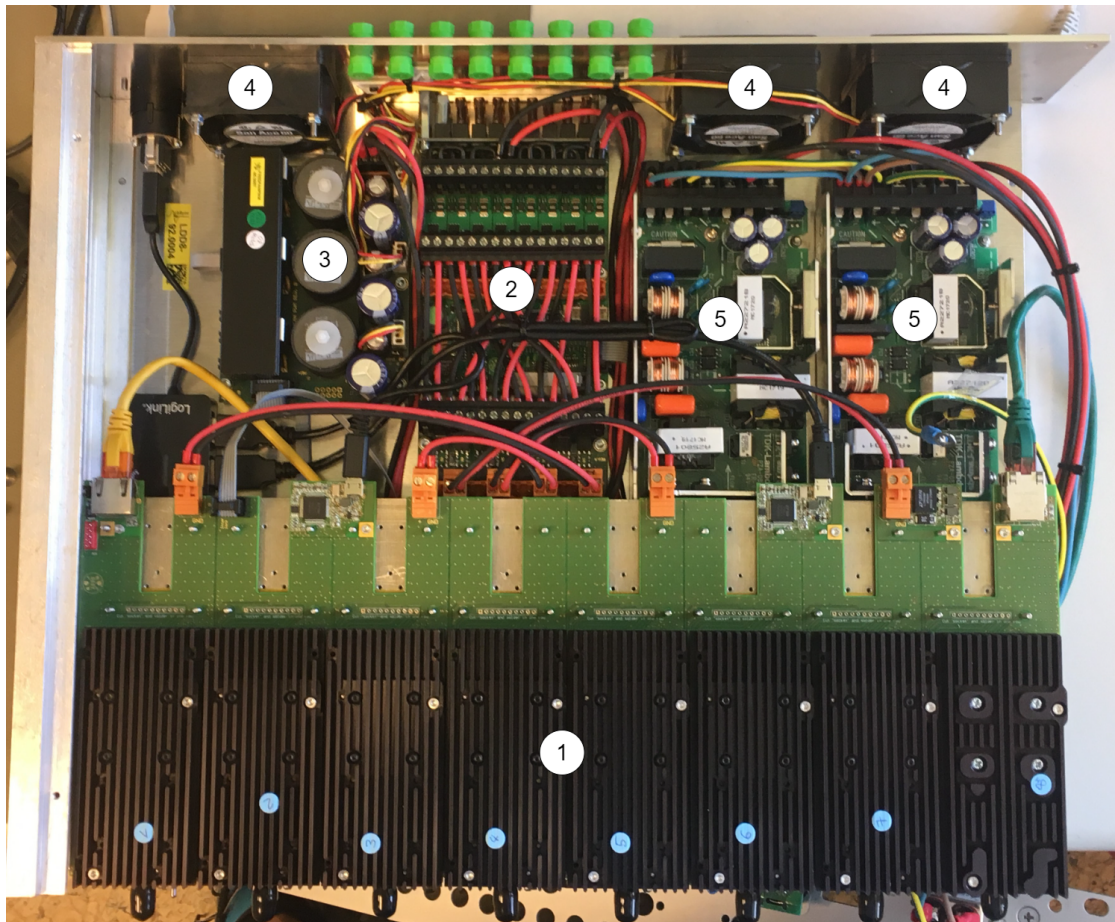


Abbildung 2.1: Beispiel einer 19-Zoll-Box mit Applikationsteil (1), FRED (2), Lüftersteuerung (3), Lüftern (4) und einer redundanten Spannungsversorgung mit zwei Netzteilen (5)

In Abbildung 2.1 ist beispielhaft ein 19-Zoll-Modul zu sehen. Mittig ist das FRED zu sehen und darunter der Applikationsteil. Dabei handelt es sich in diesem Beispiel um Treibermodule für Laserdioden. Links neben dem FRED befindet sich das bestehende System zur Lüftersteuerung und oben sind die drei Lüfter an der Rückwand zu erkennen. Rechts vom FRED befinden sich die zwei Netzteile zur redundanten Spannungsversorgung.

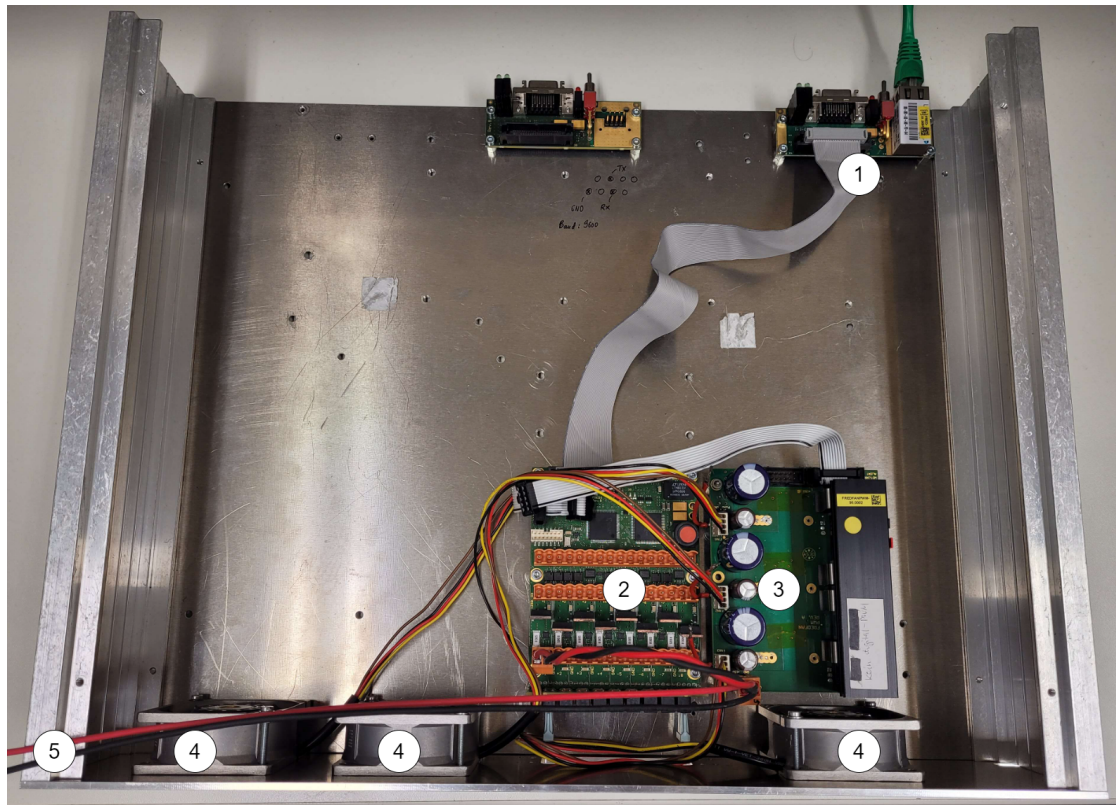


Abbildung 2.2: Reduzierte 19-Zoll-Box ohne Applikationsteil zur Untersuchung des bestehenden Systems mit LAN-Adapter (1), FRED (2), Lüftersteuerung (3), Lüftern (4) und Kabel zur Versorgung durch ein Labornetzgerät (5)

Um das alte System für die Arbeit zu untersuchen, wird der in Abbildung 2.2 gezeigte reduzierte Aufbau verwendet. Das FRED mit LAN-Adapter, das System zur Lüftersteuerung und die Lüfter sind vorhanden. Der Applikationsteil und die redundante Spannungsversorgung entfallen. Stattdessen werden FRED und Lüftersteuerung von einem Labornetzteil mit 15 V versorgt.

2.2 Funktionsweisen von Fan-Speed Controllern

Ein Fan-Speed Controller ist ein IC, welcher verwendet wird, um die Drehzahl von Lüftern zu überwachen und zu regeln. In dieser Arbeit werden der MAX6620 [2] und MAX6651 [3] betrachtet. Beide werden per I2C angesprochen, um entweder Register zu schreiben, welche Drehzahlen, Spannungen und andere Einstellungen vorgeben, oder Register zu lesen, um aktuelle Drehzahlen und andere Werte zu überprüfen. Die Fan-Speed Controller überwachen beide die Lüfterdrehzahl über ein Tachosignal und können die am Lüfter anliegende Spannung kontrollieren. Wird die Spannung am Lüfter fest vorgegeben, wird das als Open-Loop-Betrieb, DAC-Modus oder V-Modus bezeichnet. Wird dagegen die Drehzahl vorgegeben und die Spannung dynamisch eingestellt, um die Drehzahl auf diese Vorgabe zu regeln, wird das als Closed-Loop-Betrieb, RPM-Modus oder R-Modus bezeichnet. Trotz der Ähnlichkeiten weisen die Fan-Speed Controller auch wesentliche Unterschiede auf.

Das Tachosignal hat einen Rechteckverlauf mit gleichlangen High- und Low-Phasen. Die verwendeten Lüfter erzeugen für jede Umdrehung zwei Perioden des Rechtecksignals, welches damit die doppelte Frequenz wie die Drehung der Lüfter besitzt.

Der MAX6620 wertet immer eine bestimmte, zwischen 1 und 32 in Zweierpotenzen einstellbare Anzahl Tachopulse aus. Ein 11-Bit-Zähler wird mit dem internen 8192 Hz Takt hochgezählt, bis die vorgegebene Anzahl Tachopulse erkannt wurde. Es wird dann der Wert des Zählers als aktueller TACH-Count übernommen, welcher ein Maß für die Drehzahl ist. Der Parameter, über den die Anzahl der abzuwartenden Tachopulse festgelegt wird, wird Speed Range genannt, da dieser Parameter insbesondere die kleinste messbare Drehzahl festlegt. Erreicht der Zähler seinen Maximalwert, bevor die gegebene Anzahl Tachopulse erkannt wurde, kann nur davon ausgegangen werden, dass der Lüfter stillsteht. Die kleinste vom Stillstand unterscheidbare Drehzahl ist also diejenige, bei welcher der Zähler noch einen Schritt vor dem Maximalwert steht, wenn die vorgegebene Anzahl Pulse erkannt wurde.

Der MAX6651 wertet das Tachosignal aus, indem die Tachopulse in einem bestimmten Zeitraum gezählt werden. Dieser kann in Zweierpotenzen zwischen 2 s und 0,25 s eingestellt werden, wodurch der messbare Drehzahlbereich bestimmt wird. Der Zähler, welcher die Tachopulse zählt, hat 8-Bit, also einen Maximalwert von 255. Das ist die maximale Anzahl an Tachopulsen, die im vorgegebenen Zeitraum auftreten dürfen, wodurch die maximal messbare Drehzahl begrenzt wird.

Die beiden Fan-Speed Controller arbeiten also genau umgekehrt. Der MAX6620 misst die Zeit, bis eine bestimmte Anzahl Tachopulse erkannt wurde, welche die minimale Drehzahl beeinflusst, während der MAX6651 die Anzahl Tachopulse in einer bestimmten Zeit zählt, welche die maximale Drehzahl beeinflusst.

Um die Drehzahl zu beeinflussen, steuern beide Fan-Speed Controller die am Lüfter anliegende Spannung. Wie diese eingestellt wird, ist aber ebenfalls unterschiedlich. Der MAX6620 benötigt einen p-Kanal MOSFET, dessen Source mit der Lüfterversorgungs- spannung und dessen Drain mit dem Versorgungsanschluss des Lüfters verbunden ist. Der Masseanschluss des Lüfters ist fest mit der Masse verbunden. Je mehr der MOSFET sperrt, desto mehr Spannung fällt über ihn ab, sodass die Lüfterspannung und damit auch die Drehzahl reduziert wird. Das Gate des MOSFET wird vom MAX6620 über den DACOUT-Pin gesteuert und über den DACFB-Pin, welcher mit dem Drain verbunden ist, wird die Lüfterspannung als Feedback gemessen.

Der MAX6651 benötigt einen n-Kanal MOSFET, dessen Drain mit dem Masseanschluss des Lüfters und dessen Source mit Masse verbunden ist. Der Versorgungsanschluss des Lüfters ist fest mit der Versorgungsspannung verbunden. Je mehr der MOSFET sperrt, desto mehr Spannung liegt über ihm an und desto weiter wird das Potential des Masseanschlusses angehoben, sodass die Lüfterspannung sinkt. Der MAX6651 steuert über einen Pin das Gate des MOSFET an und erhält über einen anderen als Feedback die Spannung am Masseanschluss des Lüfters.

Auch in dieser Hinsicht arbeiten die Fan-Speed Controller also unterschiedlich. Der MAX6620 stellt mit einem p-Kanal MOSFET die Spannung am Versorgungsanschluss ein, während der MAX6651 über einen n-Kanal MOSFET die Spannung am Masseanschluss einstellt.

Vor allem unterscheiden sich die Fan-Speed Controller in der Anzahl regelbarer Kanäle. Der MAX6620 kann vier Lüfter individuell regeln, indem die drei Pins für Tachosignal, Ausgangsspannung und Feedback-Spannung für jeden der vier Kanäle separat existieren. Außerdem gibt es für jeden Kanal eigene Register, um Spannung oder Drehzahl und andere Einstellungen individuell zu setzen. Der MAX6651 hat auch vier Tacho-Pins, aber nur einen Pin, um die Gatespannung einzustellen und einen Feedback-Pin. So kann nur einer der Lüfter drehzahlregelt werden. Die Drehzahl der anderen kann nur überwacht werden, aber sie können keine eigene Steuerspannung zum Regeln der Drehzahl erhalten. Es existieren Register, um die aktuelle Drehzahl jedes einzelnen Lüfters auszulesen, aber es kann immer nur eine Drehzahl oder Spannung vorgegeben werden.

3 Anforderungen

3.1 Charakterisierung des Altsystems

Die Anforderungen an das neue System zur Lüftersteuerung werden hauptsächlich durch das bestehende System bestimmt. Dieses System hat vor allem den Nachteil, dass die drei Lüfter nicht individuell geregelt werden. Es wird nur einer der drei Lüfter geregelt, indem aus seinem Tachosignal die Drehzahl bestimmt und seine Versorgungsspannung so eingestellt wird, dass die Drehzahl dem gewünschten Wert entspricht. Die anderen beiden Lüfter laufen nur mit und erhalten das gleiche Steuersignal am Transistorgate zur Einstellung der Versorgungsspannung. Dadurch werden Störungen und Abweichungen bei diesen Lüftern nicht individuell kompensiert. Durch Verschleiß und Bauteiltoleranzen wird mit dem gleichen Steuersignal nicht bei allen Lüftern die gleiche Drehzahl erreicht. Hat ein Lüfter durch Verschleiß bei der gleichen Versorgungsspannung eine geringere Drehzahl, müsste die Spannung angehoben werden. Läuft der Lüfter nur mit, passiert das aber nicht und er bleibt bei einer geringeren Drehzahl. Handelt es sich dagegen bei diesem Lüfter um den geregelten, so wird seine Versorgungsspannung erhöht, um die gewünschte Drehzahl zu erreichen. In dem Fall erhalten aber auch die zwei anderen Lüfter eine höhere Spannung und drehen schneller als gewünscht. So treten Störungen mit drei verschiedenen Frequenzen anstatt mit einer auf, was nicht gewünscht ist. Außerdem werden häufig sehr niedrige Drehzahlen eingestellt, um die Störungen gering zu halten. Dabei kann es passieren, dass der geregelte Lüfter gerade noch dreht, aber einer der mitlaufenden Lüfter stehen bleibt. Um das zu verhindern, muss die Drehzahl höher eingestellt, als gewünscht, wodurch größere Störungen verursacht werden.

3.2 Regelung der Lüfterdrehzahl

Das neue System soll drei Lüfter individuell regeln können. Für jeden Lüfter soll die Drehzahl unabhängig von den anderen im Bereich von 500 rpm (rotations per minute -

Umdrehungen pro Minute) bis 10 000 rpm einstellbar sein. Dabei sollen die Drehzahlen der einzelnen Lüfter näher an der Vorgabe liegen und vor allem weniger voneinander abweichen als beim alten System. Die drei Lüfter, an denen die Drehzahlregelung getestet werden soll, sind vom Typ San Ace 60 L [22]. Diese werden normalerweise durch ein PWM-Signal auf einem vierten Anschlussdraht gesteuert, um die Drehzahl zu bestimmen. Dadurch werden aber mehr unerwünschte Störungen erzeugt. Daher soll die Drehzahl durch Einstellen der Lüfterspannung mit einem Fan-Speed Controller beeinflusst werden.

3.3 Überwachung der Stromaufnahme

Zusätzlich soll für jeden Lüfter der fließende Strom gemessen werden. Dadurch kann die Alterung der Lüfter überwacht werden. Ein verschmutzter oder verschlissener Lüfter wird mechanisch ausgebremst und erreicht dadurch bei der gleichen Versorgungsspannung und dem gleichen Strom eine geringere Drehzahl. Durch die Regelung erhält der Lüfter in diesem Fall eine größere Versorgungsspannung, um wieder die vorgegebene Drehzahl zu erreichen, sodass auch mehr Strom fließt. So kann ein solcher Lüfter daran erkannt werden, dass bei der gleichen Drehzahlvorgabe ein höherer Strom fließt als vorher. Beim alten System wird für diese Strommessung der ZXCT1041 Current Monitor [27] verwendet. Dieser wandelt die Differenzspannung über einen Shunt in eine einzelne Analogspannung um, die über den ADC eines Mikrocontrollers gemessen werden muss. Dieser wird dann wiederum über I2C ausgelesen. Um die Strommessung für das neue System umzusetzen, soll ein Power Monitor IC verwendet werden, der direkt über I2C angesprochen wird, sodass der Mikrocontroller entfallen kann. Dieser soll außerdem eine genauere Strommessung ermöglichen.

3.4 Schutz der Versorgungsspannung

Beim bestehenden System werden EMV-Filter (Elektromagnetische Verträglichkeit) eingesetzt, um die Versorgungsspannung vor Störungen durch Lastspitzen bei den Lüftern zu schützen. Für das neue System ist vorgegeben, dass diese Filter übernommen werden sollen. Dadurch sollte die Spannung auf der Versorgungsseite des Filters messbar weniger durch die Lüfter gestört sein, als auf der Lüfterseite des Filters.

3.5 Retrofit-Anforderungen

Das alte System wird vom FRED gesteuert, indem es über I2C angesprochen wird. Um das neue System mit dem FRED zu steuern, muss der Code des Mikrocontrollers auf dem FRED geändert werden, um die neuen ICs korrekt anzusprechen. Allerdings sollen nicht alle der über 100 existierenden Baugruppen unmittelbar eine neue Firmware erhalten. Daher soll eine Möglichkeit implementiert werden, dass das neue System so wie das alte angesprochen werden kann und auch so antwortet. Dazu soll ein Mikrocontroller verwendet werden, der die Kommunikation zwischen dem FRED und dem neuen System vermittelt. Da es sich dabei um eine Übergangslösung handelt und der Code des FRED langfristig angepasst werden soll, ist diese Anforderung optional und wird nur implementiert, wenn die Zeit ausreicht. Andernfalls soll das System zum Test direkt mit einem Mikrocontroller unabhängig vom FRED angesprochen werden.

3.6 Tabellarische Auflistung der Anforderungen

Die oben beschriebenen Anforderungen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst aufgelistet. Diese dient als Grundlage für die Verifikation des Systems.

Tabelle 3.1: Anforderungen an das neue System zur Lüftersteuerung

Nr.	Anforderung
1	individuelle Regelung von drei Lüftern
2	Drehzahlbereich: 500 rpm bis 10 000 rpm
3	geringere Abweichung der Drehzahl von der Vorgabe als beim bestehenden System
4	geringere Abweichung zwischen den Drehzahlen der Lüfter als beim bestehenden System
5	Strommessung mit IC, welcher per I2C angesprochen wird
6	genauere Strommessung als beim bestehenden System
7	gleiche EMV-Filter wie beim bestehenden System
8	geringere Störung durch die Lüfter auf der Versorgungsseite des Filters als auf der Lüfterseite
9	optional: Verwendung in bestehenden Aufbauten ohne Anpassung des FRED möglich

4 Design

4.1 High level design

Das Konzept des bestehenden Systems ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Darauf aufbauend wurde das Design des neuen Systems entwickelt, welches dessen Nachteile korrigieren soll.

In Abbildung 4.2 ist das Design des neuen Systems als Blockschaltbild dargestellt. Das System wird mit einer Spannung von 15 V versorgt. Diese wird durch jeweils einen linearen Spannungsregler auf drei Versorgungsspannungen von 12 V aufgeteilt, was der nominalen Versorgungsspannung der Lüfter entspricht. Jede der drei Spannungen wird außerdem gefiltert, um EMV-Störungen zu reduzieren. Zwischen Spannungsregler und Filter wird für jeden der drei Kanäle der Strom gemessen. Jede der drei Versorgungsspannungen versorgt jeweils einen Lüfter. Durch MOSFETs wird gesteuert, welcher Anteil der Versorgungsspannung am Lüfter anliegt, wodurch die Drehgeschwindigkeit des Lüfters geregelt wird. Der Fan-Speed Controller misst über ein Tacho-Signal die individuelle Drehzahl jedes Lüfters und steuert über den MOSFET die Versorgungsspannung. Die ICs für Strommessung und Drehzahlregelung werden über den seriellen Datenbus I2C angesprochen. Es besteht die Möglichkeit, die beiden ICs vom FRED direkt anzusprechen. Um aber das System verwenden zu können, ohne den Code des FRED zu ändern, welcher dafür konzipiert ist, das alte System anzusprechen, kann der Bus aufgetrennt werden und durch einen Mikrocontroller die Kommunikation vermittelt werden. So wird eine sogenannte Retrofit-Lösung erreicht.

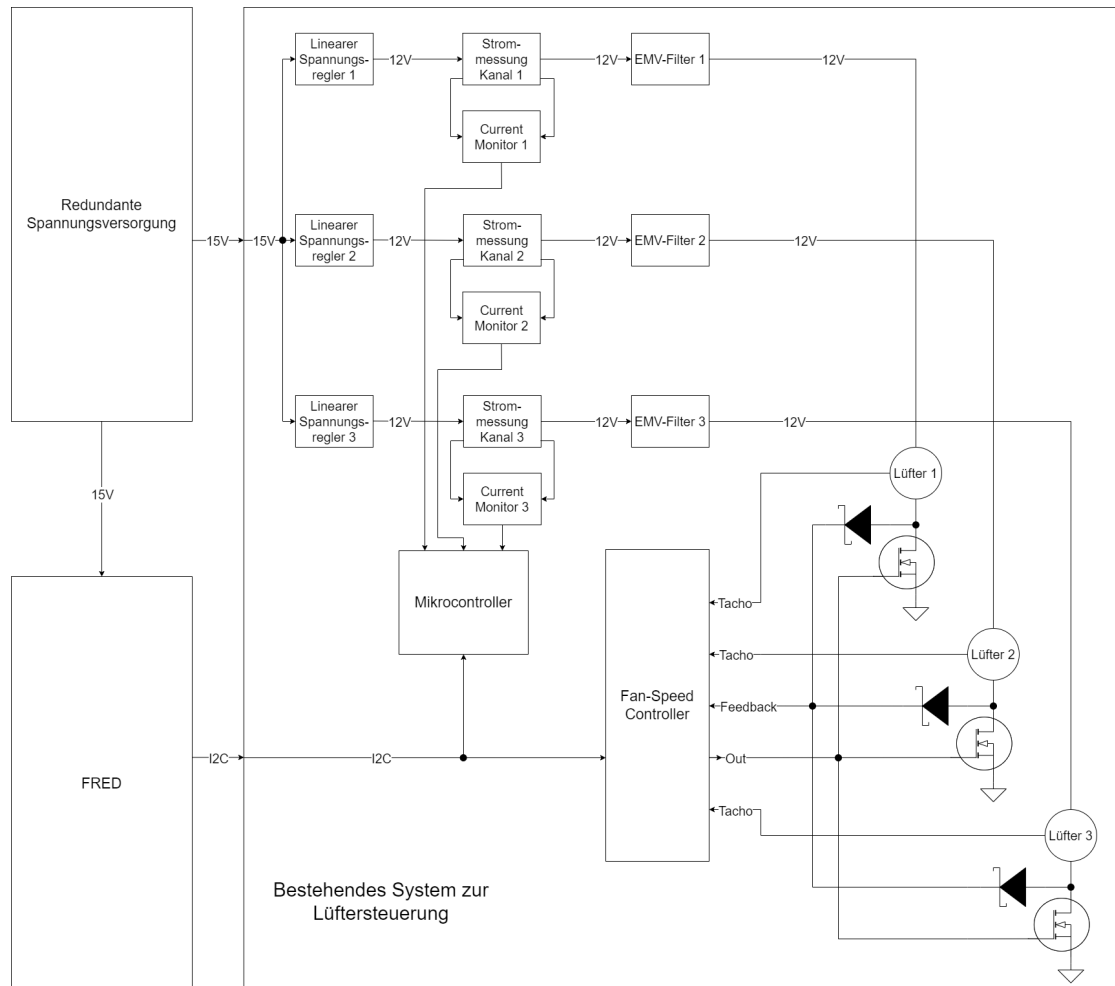


Abbildung 4.1: Konzept des bestehenden Systems zur Lüftersteuerung: Die Strommessung wird durch drei Current Monitors durchgeführt, die von einem Mikrocontroller ausgelesen werden müssen. Der Fan-Speed Controller hat nur ein Ausgangssignal und erhält ein Feedbacksignal. Durch Schottky Dioden sind die Feedbacksignale der Lüfter zusammengeschaltet.

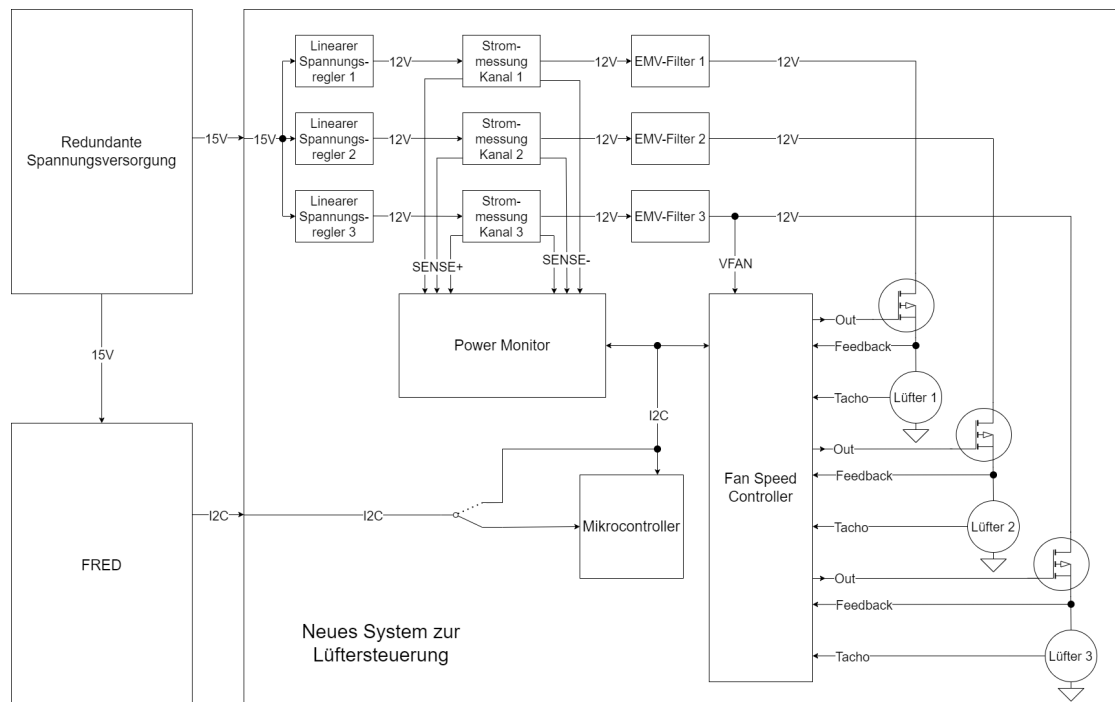


Abbildung 4.2: Design des neuen Systems zur Lüftersteuerung

4.2 Fan-Speed Controller

Um die Drehzahl der Lüfter zu regeln, wird der MAX6620 Quad Linear Fan-Speed Controller verwendet. Dieser IC überwacht bis zu 4 Lüfter über je ein Tachometer-Signal. Dabei handelt es sich um ein Rechtecksignal mit einer Periode für jede halbe Umdrehung des Lüfters. Dieses wird vom Lüfter über jeweils eine individuelle Leitung übertragen und liegt jeweils an einem der Pins des Fan-Speed Controllers an. Über einen DAC wird die Gate-Spannung eines p-Kanal MOSFETs eingestellt. Hierdurch wird bestimmt, welche Versorgungsspannung am Lüfter anliegt. Als Feedback erhält der Fan-Speed Controller die Spannung, die tatsächlich am Versorgungspin des Lüfters anliegt. Diese drei Pins, zum Steuern des Gates, für die Feedback-Spannung und das Tacho-Signal, existieren für jeden der vier Kanäle getrennt, wobei der vierte nicht verwendet wird. So können die drei Lüfter also individuell geregelt werden. Der Fan-Speed Controller erhält als Referenz die 12 V Versorgungsspannung.

4.3 Lüfterstromversorgung mit EMV-Filter

Damit die Lüfter durch Lastspitzen keine Störung der Versorgungsspannung verursachen, werden EMV-Filter verwendet. Für jeden der drei Kanäle wird ein eigener Filter zwischen Strommessung und MOSFET verwendet. Dieses Filter wird vom bestehenden System übernommen.

4.4 Stromüberwachung der einzelnen Lüfter

Für jeden der drei Kanäle wird zwischen Spannungsregler und EMV-Filter der Strom gemessen. Dazu wird der PAC1954 Power Monitor [18] verwendet. Dieser IC kann für bis zu vier Kanäle die in einer Last umgesetzte Leistung überwachen, indem die Versorgungsspannung und der Laststrom gemessen werden. Dabei ist die Spannung, die vom Power Monitor aus gesehen über der Last anliegt, die 12 V-Ausgangsspannung des Spannungsreglers. Die Last ist die Kombination aus EMV-Filter, MOSFET und Lüfter. Um den Strom messen zu können, wird pro Kanal ein Shunt-Widerstand verwendet. Der IC hat für jeden Kanal einen Pin SENSEn+, der mit der Versorgungsspannungsseite des Shunt-Widerstands verbunden wird und einen SENSEn- Pin, der mit der Last-Seite des

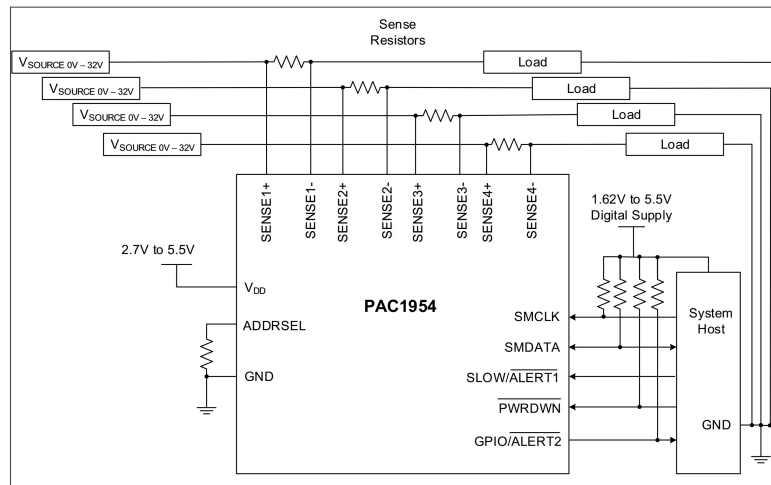


Abbildung 4.3: Typische Beschaltung des Power Monitors PAC1954 aus dem Datenblatt [18, p 21]

Shunt-Widerstands verbunden wird. In Abbildung 4.3 ist die typische Beschaltung des Power Monitors dargestellt.

Die Versorgungsspannung aller vier SENSEn+ Pins wird mit einem einzigen 16-Bit-ADC mit 32 V FSR (Full Scale Range - messbarer Spannungsbereich) gemessen, der über einen Spannungsmultiplexer nacheinander zu jedem der vier Pins geschaltet wird. Die Differenzspannung über den Shunt zwischen SENSEn+ und SENSEn- wird über einen 16-Bit-ADC mit 100 mV FSR gemessen. Der Shunt-Widerstand muss also so gewählt werden, dass beim maximal auftretenden Strom (eventuelle Stromspitzen müssen beachtet werden) die Spannung über den Widerstand 100 mV nicht übersteigt. Außerdem muss berücksichtigt werden, welche Leistung der Widerstand bei maximalem Strom aufnimmt und eine Bauform gewählt werden, die diese Leistung aushält. Die Messwerte für Spannung und Strom können direkt ausgelesen werden, oder als gleitender Mittelwert über die letzten 8 Messwerte. Die Hauptfunktion des Power Monitors, die aus Strom und Spannung berechnete Leistung zu überwachen, wird für dieses System nicht verwendet. Stattdessen wird hauptsächlich der Strom überwacht. Durch eine langfristige Überwachung des Lüfterstroms kann die Alterung des Lüfters beobachtet und dieser rechtzeitig ausgetauscht werden.

4.5 Mikrocontrollerbasiertes Kommunikationsinterface

Damit das neue System anstelle des alten Systems in bestehenden Aufbauten verwendet werden kann, muss die Kommunikation durch einen Mikrocontroller vermittelt werden. Es soll der SAMD20J18 [19] verwendet werden. Im alten System wurde der MAX6651 zur Regelung der Lüfterdrehzahl verwendet. Dieser wurde über das FRED direkt per I2C angesprochen, um Register zu schreiben, um so Einstellungen wie die Drehzahlvorgabe zu ändern oder um diese zu lesen, um Informationen wie die aktuelle Lüfterdrehzahl abzufragen. Der MAX6620 hat einen anderen Aufbau seiner Registerstruktur, weshalb der Mikrocontroller vermitteln muss. Soll ein Register geschrieben werden, kann aus den zu schreibenden Werten ermittelt werden, welche Einstellung gemacht werden sollte und dann der dafür notwendige Befehl an den neuen Fan-Speed Controller gesendet werden. Soll die Drehzahl gelesen werden, so wird eine Antwort mit dem nächsten I2C-Takt erwartet. Mit Clockstretching kann die Antwort verzögert werden, bis die zu sendenden Werte zur Verfügung stehen, dadurch wird aber der Bus blockiert. Deshalb sollen die Register für die Drehzahl vom Mikrocontroller zyklisch ausgelesen werden, sodass immer ein aktueller Wert zwischengespeichert ist, der ausgelesen werden kann.

5 Implementierung

5.1 Schaltplan

Um den Schaltplan zu erstellen, wird das Programm Altium Designer [1] verwendet. Dieses bietet auch die Möglichkeit, auf Grundlage des Schaltplans ein Platinenlayout zu entwickeln. Dieses wurde aber im Rahmen der Arbeit nicht mehr erstellt. Das Programm bietet zudem die Möglichkeit, mit Design Rule Checks die Schaltung auf Fehler zu untersuchen. Außerdem kann der Schaltplan zur besseren Übersicht in mehrere Schaltplandokumente aufgeteilt werden. Dabei wird in diesem Fall ein hierarchisches Schaltplandesign verwendet. In einem Top-Level-Schaltplan sind die übrigen Teilschaltpläne als Blöcke enthalten. Für jeden Block können Eingangs- und Ausgangsports definiert werden, über die Verbindungen zwischen dem Top-Level-Schaltplan und den Teilschaltplänen hergestellt werden. Im Top-Level-Schaltplan können dann die Ports der einzelnen Blöcke miteinander verbunden werden. Es können lokale Net Labels definiert werden, um Verbindungen innerhalb eines Teilschaltplans herzustellen. Außerdem können globale Labels definiert werden, zum Beispiel für die Masse oder eine bestimmte Versorgungsspannung. Durch diese können auch Verbindungen zwischen verschiedenen Teilschaltplänen hergestellt werden. Diese werden im Top-Level-Schaltplan nicht angezeigt, sondern werden durch die Verwendung des gleichen globalen Labels in verschiedenen Teilschaltplänen impliziert.

5.1.1 Top

Der Top-Level-Schaltplan (kurz Top) in Abbildung 5.1 enthält die Teilschaltpläne:

- InputOutput: Verbindung nach außen
- Power_Monitor: Spannungsregler, Strommessung und EMV-Filter
- Fan_Controller: Drehzahlregelung und Verbindung zu den Lüftern
- Microcontroller: Kommunikationsinterface

Ein wichtiger Teil der Verbindungen zwischen den Teilschaltplänen wird hier durch globale Spannungslabels hergestellt. Über InputOutput werden sowohl 3,3 V zur Verfügung gestellt, die in den drei anderen Teilschaltplänen als Versorgung der ICs und des Mikrocontrollers verwendet werden, als auch 15 V, die im Power_Monitor-Schaltplan heruntergeregelt werden. Die drei im Power_Monitor-Schaltplan erzeugten 12 V-Spannungen werden im Fan_Controller-Schaltplan zur Versorgung der Lüfter verwendet. Außerdem wird eine globale Masse GND für die 3,3 V Spannungen und eine globale Leistungsmasse PGND für die 12 V verwendet. Von den Verbindungen, die auf dem Top-Schaltplan dargestellt werden, sind vor allem die zwei getrennten I2C-Busse zu beachten. Über den internen I2C-Bus können Power Monitor und Fan-Speed Controller angesprochen werden. Dieser kann über InputOutput nach außen durchgeschaltet werden, um die ICs vom FRED direkt anzusprechen. Um die Retrofit-Lösung zu verwenden, wird stattdessen vom FRED über den getrennten MC_I2C Bus nur der Mikrocontroller als Slave angesprochen, der dann als Master auf dem internen I2C-Bus die ICs anspricht. Die sonstigen Ports dienen dazu, einige Pins der ICs, sowie die PWM-Anschlüsse der Lüfter mit dem Mikrocontroller zu verbinden. Diese werden aktuell nicht verwendet, durch die Verbindung zum Mikrocontroller wird aber die Möglichkeit offen gehalten, sie in Zukunft doch noch zu verwenden.

5.1.2 InputOutput

Der Schaltungsteil InputOutput umfasst hauptsächlich die Verbindungen nach außen zur Kommunikation und Spannungsversorgung. Einige der Blöcke sind vollständig oder mit Anpassungen aus dem Schaltplan des alten Systems übernommen. Dieses Dokument ist nicht öffentlich verfügbar und wird auf der CD mit der Arbeit abgegeben.

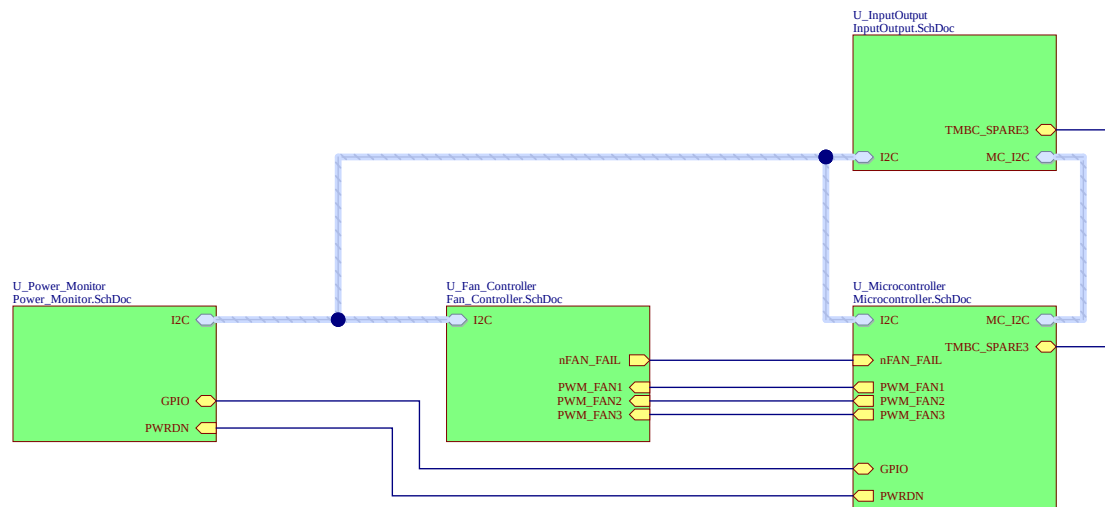


Abbildung 5.1: Schaltplan Top erstellt mit Altium Designer

Über den FRED Board Connector (Abbildung 5.2) ist das System mit der zentralen Steuerung, dem FRED, verbunden. Über diese Verbindung wird das System mit 15 V und 3,3 V versorgt und an den I2C-Bus angeschlossen. Es sind hier sicherheits- halber Pull-Up-Widerstände für die I2C-Leitungen geplant. Standardmäßig sollen die- se Widerstände nicht bestückt werden, da auf dem FRED bereits Pull-Ups vorhanden sind. Für den Fall, dass hier doch Pull-Ups benötigt werden, sollen aber beim Pla- tinenlayout Footprints für Widerstände eingeplant werden. Um das anzuzeigen, bie- tet Altium die Möglichkeit, die Widerstände auf do not populate (DNP) zu setzen. So wird die Möglichkeit offen gehalten, einen Widerstand einzubauen, aber mit dem Hinweis, dass dieser standardmäßig nicht bestückt werden soll. Die I2C-Leitungen sind über Net Labels mit den Blöcken Connection between FRED_I2C and FAN_I2C, TMCB Output Connector und Temperature Sensor verbunden. Die TMCB_SPARE- Pins sind mit dem Block TMCB Output Connector verbunden oder durch Ports her- ausgeführt.

Der Block Connection between FRED_I2C and FAN_I2C (Abbildung 5.3) stellt die Verbindung zwischen dem über FRED Board Connector angeschlossenen I2C-Bus und einem der beiden internen I2C-Busse her und wurde neu hinzugefügt. Es wird entwe- der direkt eine Verbindung zu dem I2C-Bus hergestellt, über den die ICs angesprochen werden können, oder es wird nur der MC_I2C nach außen geführt, über den der Mikrocon- troller als Slave angesprochen werden kann, damit er die Kommunikation zum internen I2C-Bus vermittelt.

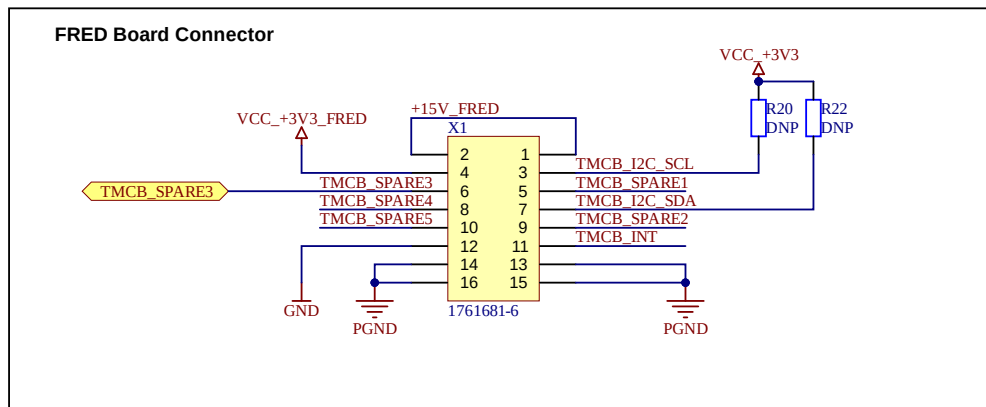


Abbildung 5.2: Teil FRED Board Connector von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

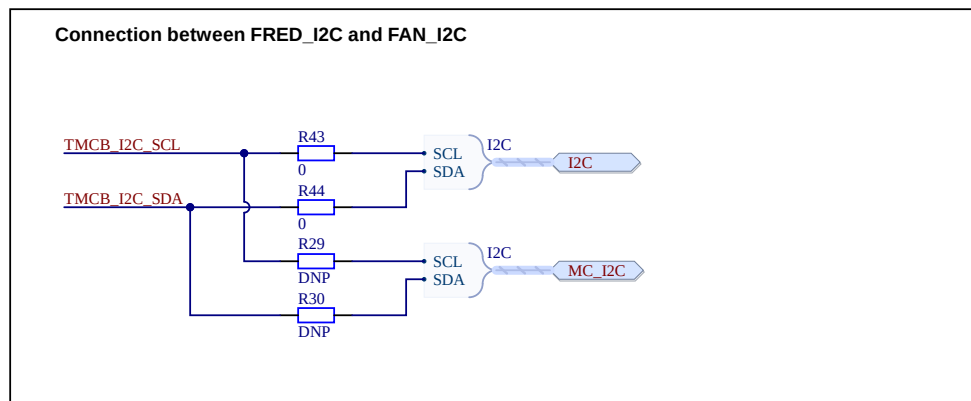


Abbildung 5.3: Teil Connection between FRED_I2C and FAN_I2C von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

Dazu wird zum einen Bus über 0Ω -Widerstände eine Verbindung hergestellt, während die Verbindung zum anderen Bus auf DNP gesetzt wird. So können beide Optionen mit der gleichen Platine erreicht werden, je nachdem, wo die 0Ω -Widerstände bestückt und wo sie weggelassen werden.

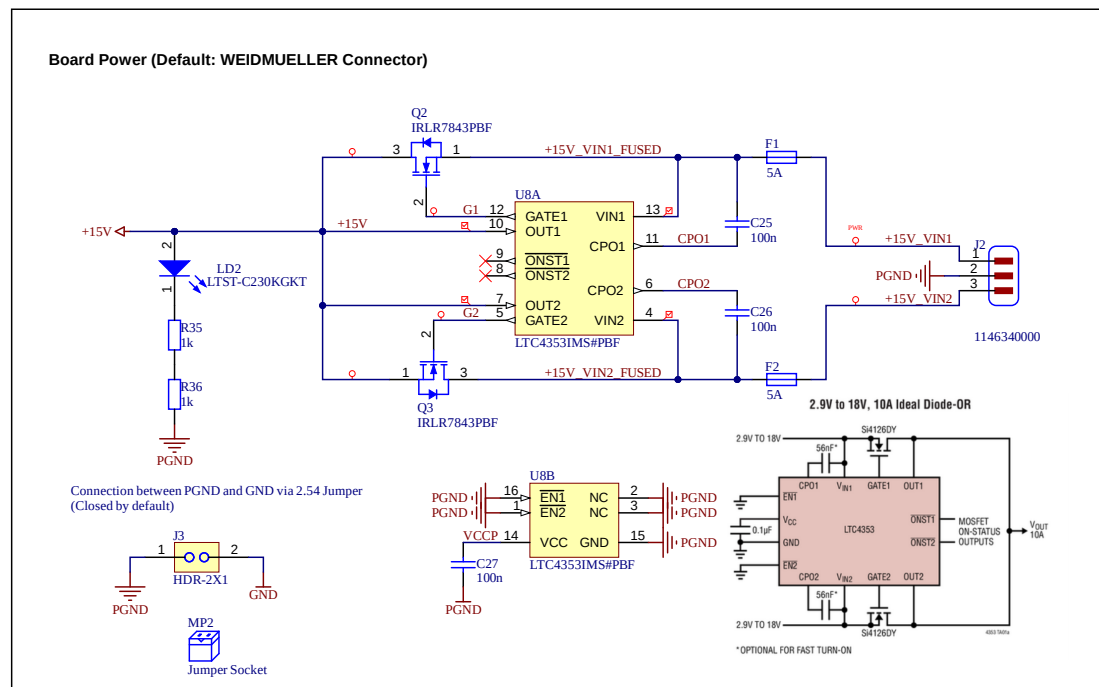


Abbildung 5.4: Teil Board Power von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

Der Block Board Power (Abbildung 5.4) ist für die Bereitstellung der 15 V zuständig. Für eine redundante Spannungsversorgung werden zwei separate 15 V Spannungen eingespeist. Diese können nicht einfach parallel geschaltet werden, da die beiden Spannungsversorgungen bei kleinen Abweichungen ständig gegeneinander arbeiten würden. Durch eine Schaltung mit einem LTC4353 Dual Low Voltage Ideal Diode Controller [14] wird aus den zwei Spannungen eine Versorgungsspannung für das Board erzeugt, die auch bei Ausfall einer der beiden Spannungen stabil bleibt. Eine grüne LED zeigt an, ob 15 V Spannung anliegt. Der LTC4353 ist als zwei getrennte Schaltplansymbole dargestellt, es handelt sich aber um einen einzelnen IC. Eine zusätzlich eingefügte Grafik zeigt den gesamten IC mit seiner Beschaltung. In diesem Block ist auch ein Jumper enthalten, über den wahlweise PGND und GND zu einer gemeinsamen Masse-Referenz verbunden werden können.

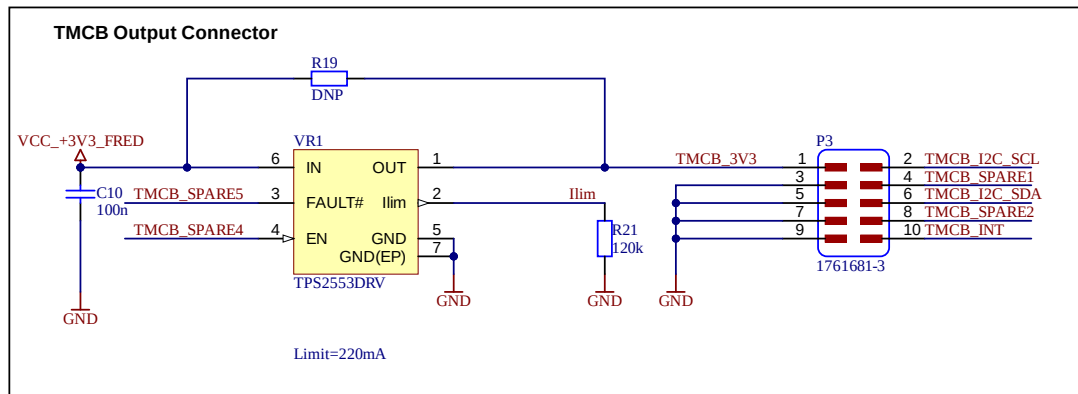


Abbildung 5.5: Teil TMCB Output Connector von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

Der Block TMCB Output Connector (Abbildung 5.5) wurde vom alten System mit angepassten Schaltplansymbolen übernommen. Über diesen Connector kann zusätzlich das TMCB (Temperature Monitoring and Control Board) angeschlossen und mit 3,3 V versorgt werden. Dazu wird ein einstellbarer strombegrenzter Leistungsverteiler verwendet (TPS2553DRV [24]), um die 3,3 V vom FRED weiterzugeben. Ein DNP-Widerstand hält die Möglichkeit offen, den Leistungsverteiler zu brücken und die 3,3 V direkt anzuschließen.

Der Block Local 3V3 Power (Abbildung 5.6) wurde vom alten System übernommen. Über einen Spannungsregler (LDO - Low Drop Out [13]) wird aus 15 V 3,3 V erzeugt. Über einen Jumper kann entweder die so erzeugte 3,3 V Spannung, oder die über den FRED Board Connector gelieferte 3,3 V-Spannung ausgewählt werden, um als globale Versorgungsspannung zu dienen. Eine grüne LED zeigt an, ob tatsächlich Spannung auf dem gewählten 3,3 V-Pfad anliegt.

Der Block Temperature Sensor (Abbildung 5.7) wurde mit angepasstem Schaltplansymbol vom alten System übernommen. Dieser Temperatursensor (MAX6626 [16]) wird mit 3,3 V versorgt und kann per I2C vom FRED aus angesprochen werden.

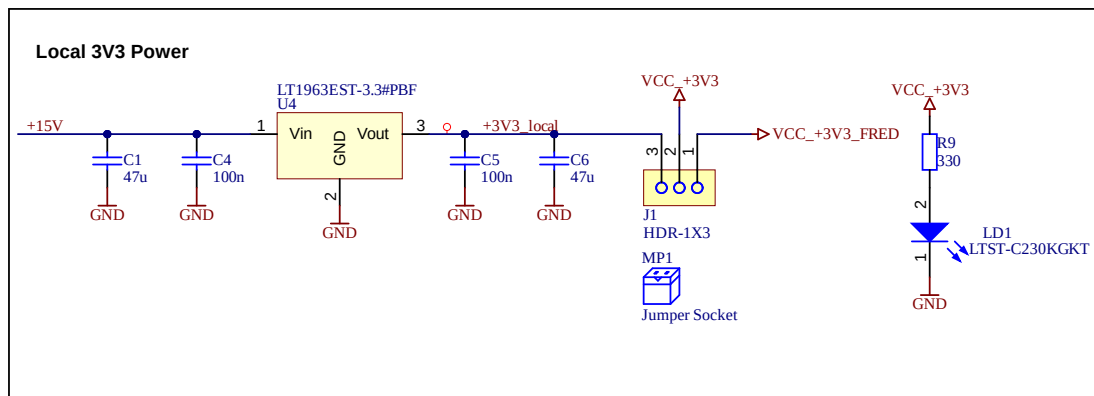


Abbildung 5.6: Teil Local 3V3 Power von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

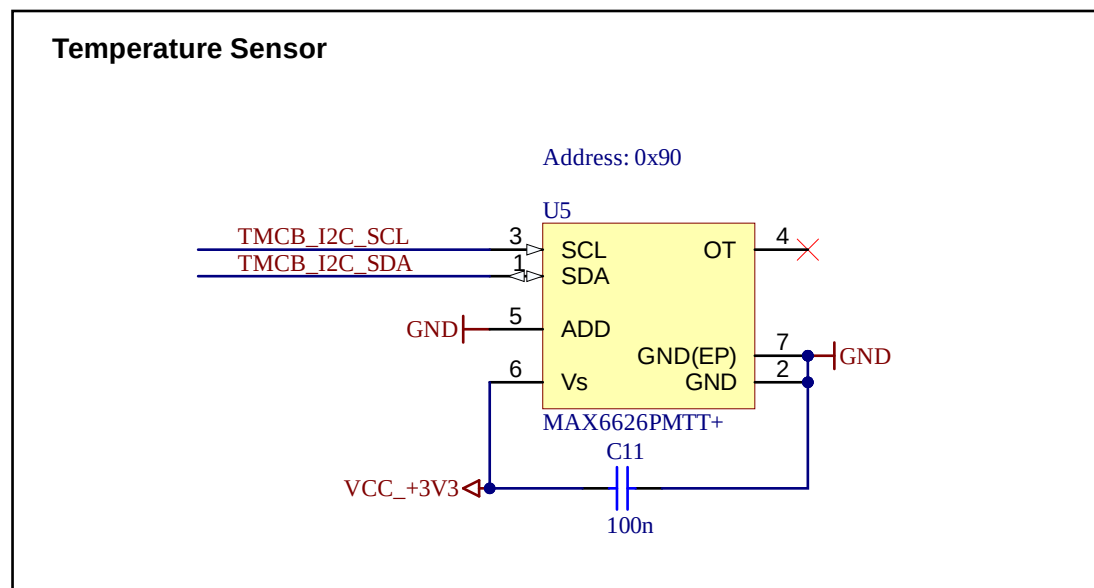


Abbildung 5.7: Teil Temperature Sensor von Schaltplan InputOutput erstellt mit Altium Designer

5.1.3 Power_Monitor

Der Teilschaltplan `Power_Monitor` (Abbildung 5.8) umfasst neben der Strommessung den gesamten Spannungspfad von der 15 V Spannung zu drei gefilterten 12 V Spannungen. Die durch `InputOutput` zur Verfügung gestellte 3,3 V Versorgungsspannung wird mit einer Spule und mehreren Kondensatoren gefiltert. Diese bilden einen PI-Filter, der bei vielen Projekten bei DESY zum Einsatz kommt. Dadurch soll vor allem die allgemeine 3,3 V Versorgungsspannung vor Störungen durch den IC geschützt werden. Der Power Monitor ist mit dem I2C-Bus verbunden. Der Pin zur Auswahl der I2C-Adresse (`ADDRSEL`) wird über einen 0Ω Widerstand auf Masse gezogen, wodurch der IC die Adresse `0x10` erhält. Die `SENSEn+` und `SENSEn-` Pins der Kanäle 1 bis 3 sind zur Strommessung mit drei Shunts verbunden. Die Pins des vierten, nicht verwendeten Kanals sind, wie im Datenblatt empfohlen, auf Masse gezogen. Die Pins `PWRDN`, `SLOW` und `GPIO` werden nicht benötigt. Für den Fall, dass diese später doch verwendet werden sollen, werden sie aber trotzdem so angeschlossen, dass das noch möglich ist. Wird `PWRDN` auf Low gezogen, geht der IC in einen Ruhezustand über. Damit das standardmäßig nicht passiert, wird ein Pull-Up-Widerstand verwendet. Der Pin wird zusätzlich auch über einen Port zum Mikrocontroller verbunden, sodass er bei Bedarf durch diesen auf Low gezogen werden kann. Wird der `SLOW`-Pin auf High gezogen, wird die Abtastrate für alle Kanäle auf 8 SPS reduziert. Dieser Pin ist durch einen 0Ω Widerstand auf Masse gezogen, kann aber durch Umbestücken auf den DNP-Platz auf High gezogen werden. Der `GPIO`-Pin kann für verschiedene Funktionen als Eingangspin oder Ausgangspin verwendet werden und wird wie `PWRDN` mit einem Pull-Up und einem Mikrocontroller-Pin verbunden. `SLOW` und `GPIO` können beide als Output konfiguriert werden, um bestimmte Alarmfälle anzuzeigen. Dies ist durch die Beschaltung bei `SLOW` nicht mehr möglich, aber der `GPIO`-Pin kann bei Bedarf mit dem Mikrocontroller gelesen werden.

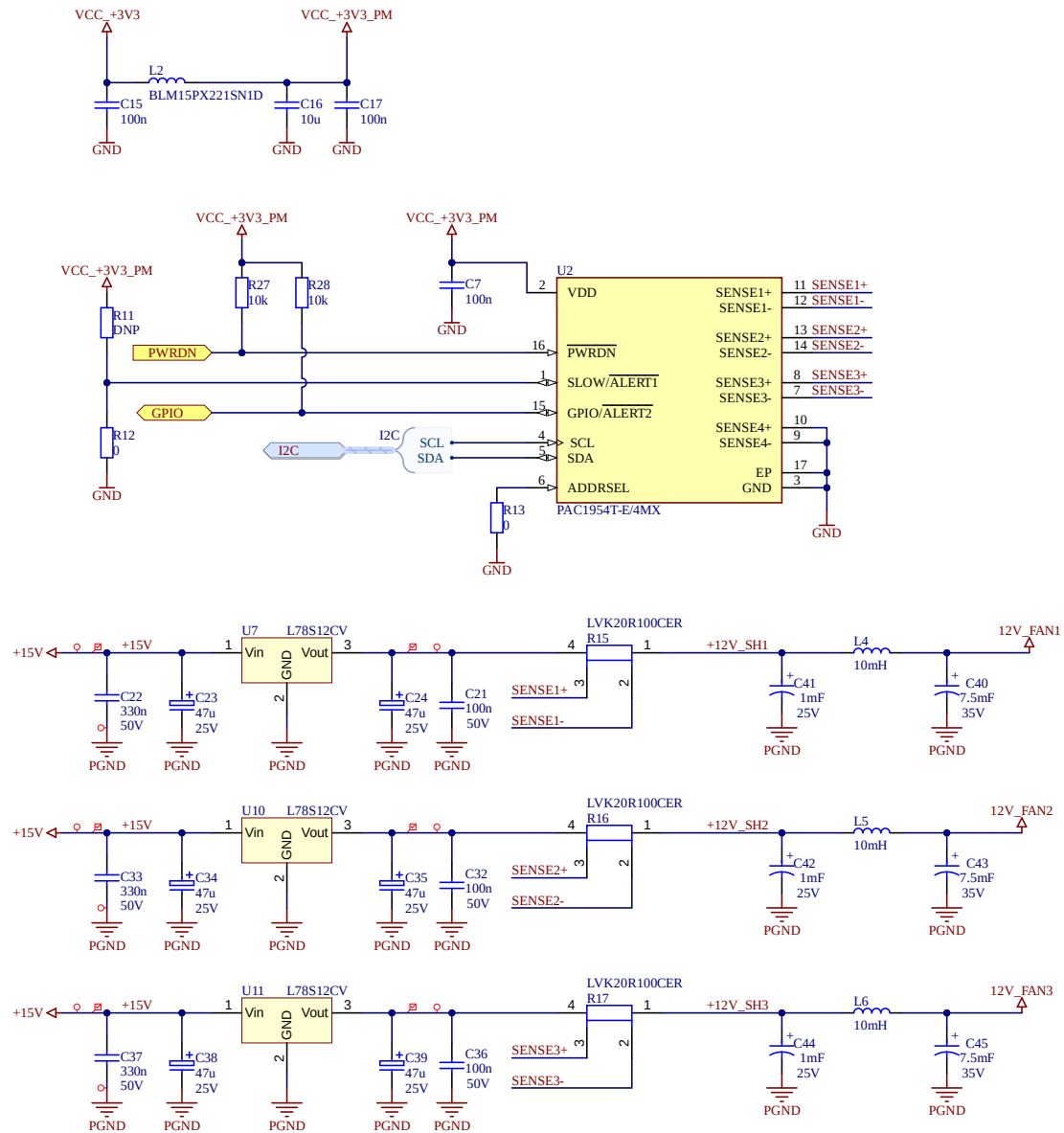


Abbildung 5.8: Schaltplan Power_Monitor erstellt mit Altium Designer

Die von `InputOutput` bereitgestellten 15 V werden zunächst auf drei Pfade aufgeteilt, die identisch zueinander sind, aber zu verschiedenen Kanälen der Strommessung gehören und verschiedene Lüfter versorgen. Die Spannung wird zunächst durch einen linearen Spannungsregler (L78S [23]) auf 12 V geregelt. Dieser Schaltungsteil mit Regler und Kondensatoren wurde vom alten System übernommen. Hinter dem Spannungsregler liegt der Shunt für die Strommessung. Der Shunt hat den Wert $0,1\ \Omega$. Damit können aufgrund der 100 mV FSR des Power Monitors für die Strommessung Ströme bis 1 A gemessen werden. Da die verwendeten Lüfter bei maximaler Drehzahl einen Strom von 0,67 A benötigen, ist der Bereich des ADC mit 2/3 gut ausgesteuert und es können trotzdem Ströme, die höher als gewöhnlich sind und auf ein Problem des Lüfters hinweisen, gemessen werden.

Das EMV-Filter liegt hinter der Strommessung und entspricht dem des alten Systems. Es handelt sich um ein CLC-Filter. Dieses soll verhindern, dass Störungen durch Lastspitzen bei den Lüftern die Strommessung und die 15 V-Versorgung stören. Die DC-Motoren der Lüfter erzeugen starke EMV-Störungen, die das Filter abfangen muss, damit die Versorgungsspannung nicht gestört wird. So kann auch der Mittelwert des Stromes besser gemessen werden, der für die langfristige Stromüberwachung der Lüfter entscheidend ist, und wird weniger durch kurze Stromspitzen beeinflusst.

5.1.4 Fan_Controller

Der Fan-Speed Controller IC (Abbildung 5.9) erhält wie der Power Monitor eine 3,3 V Versorgungsspannung, die mit einem identischen PI-Filter stabilisiert wird. Der IC ist mit dem I2C-Bus verbunden. Die Adresse, über die der IC als Slave angesprochen wird, kann durch den ADDR-Pin aus drei Optionen ausgewählt werden, indem eine Verbindung zu GND oder VCC oder keine Verbindung hergestellt wird. Nach dem gleichen Prinzip können an anderen Pins Startwerte für bestimmte Einstellungen wie den I2C-Watchdog bestimmt werden. Durch die Kombination aus 0Ω und DNP Widerstand zu GND und VCC werden bei diesen Pins alle Optionen offen gehalten, je nachdem, wie die Widerstände tatsächlich bestückt werden. In Abbildung A.1 im Anhang ist die im Datenblatt gegebene Beschreibung aller Pins dargestellt. Am FAN-Pin erhält der IC die 12 V Lüfterversorgungsspannung als Referenzwert. Alternativ könnten auch 5 V angeschlossen werden, um entsprechend 5 V-Lüfter zu steuern. Hier wird eine der gefilterten 12 V, die vom Power_Monitor Schaltplan zur Verfügung gestellt wird, angeschlossen. Hier ist Kanal 1 angegeben, aber auch die anderen beiden Kanäle sind möglich, falls diese bei der Erstellung des Layouts eine günstigere Position ergeben. Entsprechend der Vorgabe des Datenblatts ist der Pin zusätzlich über einen 100 nF Kondensator gegen GND verbunden. So wird die Spannung stabilisiert, damit diese nicht einbricht, wenn der IC kurze Lastpulse erzeugt. An den Pins X1 und X2 ist ein externer Quarzoszillator angeschlossen. Dieser ermöglicht eine genauere Messung der Drehzahl. Der Pin DAC_START dient dazu, festzulegen, mit welcher Spannung die Lüfter beim Zuschalten der Betriebsspannung betrieben werden sollen, bis über I2C ein anderer Wert vorgegeben wird. Der SPINUP_START-Pin bestimmt, ob an einem stehenden Lüfter zunächst die volle Versorgungsspannung angelegt wird, bis die erste Umdrehung erkannt wurde, damit er sicher startet. Der WD_START-Pin gibt vor, ob der I2C-Watchdog zu Beginn eingeschaltet ist, welcher dafür sorgt, die Lüfterspannung auf das Maximum zu setzen, falls eine bestimmte Zeit lang keine I2C-Kommunikation mehr stattgefunden hat. Der FAN_FAIL-Pin wird vom IC auf Masse gezogen, wenn eine Fehlfunktion der Lüfter erkannt wird. In dem Fall liegt die LED in Durchlassrichtung und leuchtet, um den Fehler anzuzeigen. Ansonsten wird das Signal nicht ausgewertet, eine Verbindung zum Mikrocontroller wird aber trotzdem vorgesehen, falls das Signal doch verwendet werden soll.

Für jeden der drei Kanäle gibt es drei IC-Pins, eine Transistorschaltung und einen Stecker zum Anschließen des Lüfters. Pin 1 des Steckers ist der Masseanschluss des Lüfters und wird direkt zum PGND geschaltet. Pin 3 ist das Tachosignal, welches einen Pull-Up

auf 12 V erhält und am TACH-Pin des ICs angeschlossen ist. Dieser Pin wird von einem drehenden Lüfter abwechselnd auf Masse gezogen und freigegeben, sodass der Pull-Up ihn auf 12 V zieht. So wird ein Rechtecksignal mit zwei Perioden pro Lüfterumdrehung erzeugt, über das der IC die Drehzahl des Lüfters bestimmen kann. Der vierte Pin des Lüfters kann verwendet werden, um den Lüfter durch PWM zu steuern, was vom Fan-Speed Controller IC nicht unterstützt wird und auch aufgrund weiterer Störungen durch das PWM-Signal nicht gewünscht ist. Um trotzdem die Möglichkeit einer PWM-Steuerung zu wahren, wird das Signal an einen PWM-fähigen Pin des Mikrocontrollers gelegt. Pin 2 des Lüfters ist der Versorgungspin, dessen Spannung variiert wird, um die Drehzahl zu verändern. Diese tatsächlich anliegende Lüfterspannung erhält der IC über den DACFB-Pin als Rückmeldung, welche Spannung eingestellt wurde. Um die Lüfterspannung einzustellen, gibt der IC mit einem DAC eine Spannung über den DACOUT-Pin an das Gate eines selbstsperrenden P-Kanal MOSFETs. Durch einen Pull-Up Widerstand liegt das Gate standardmäßig auf der gleichen 12 V-Spannung wie der Source-Pin. Dadurch sperrt der MOSFET, sodass kein Strom zum Lüfter fließen kann und die ganze Spannung zwischen Source und Drain abfällt und nicht am Lüfter. Zieht der IC das Gate auf ein niedrigeres Potential, schaltet der MOSFET immer weiter durch, sodass mehr Strom fließen kann und nur noch ein Teil der Spannung am MOSFET abfällt, während der Rest als Versorgungsspannung am Lüfter anliegt.

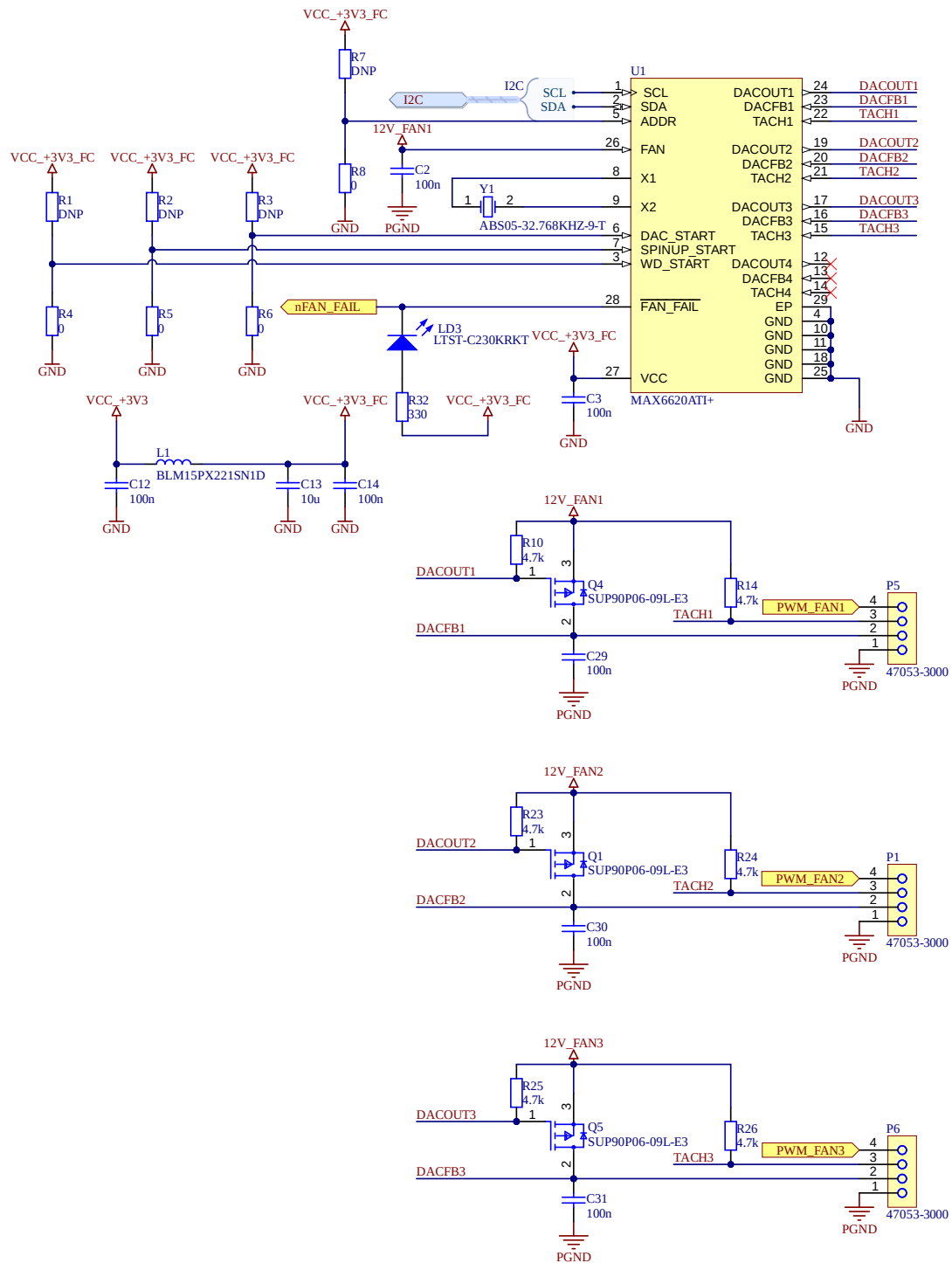


Abbildung 5.9: Schaltplan Fan_Controller erstellt mit Altium Designer

5.1.5 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller SAMD20J18 (Abbildung 5.10) wird wie die ICs über einen eigenen PI-Filter mit 3,3 V versorgt. Die verschiedenen Versorgungs- und Massepins sind entsprechend den Vorgaben im Datenblatt mit Kondensatoren und Spulen verschaltet. Die PWM-Pins der drei Lüfter sind mit Mikrocontrollerpins verbunden, auf denen über die Timer des Mikrocontrollers eine PWM erzeugt werden kann. Das FAN_FAIL-Signal des Fan-Speed Controllers und der GPIO-Pin des Power Monitors sind mit GPIO-Pins des Mikrocontrollers verbunden, die bei Bedarf auch als Interruptquelle konfiguriert werden können. Der PWRDN-Pin des Power Monitors kann über einen GPIO-Pin des Mikrocontrollers bei Bedarf auf Low gezogen werden, um den Power Monitor in Ruhezustand zu bringen. Der I2C-Bus, der für die Retrofitlösung FRED und Mikrocontroller verbindet, ist am Mikrocontroller mit einem I2C-fähigen Pinpaar verbunden. Optional kann ein zweites Pinpaar angeschlossen werden. Das FRED spricht bei Kommunikation mit dem alten System zwei verschiedene Adressen für die Strommessung und den Fan-Speed Controller an. Es könnten zwei I2C-Interfaces verwendet werden, die jedes nur auf eine der zwei Adressen reagieren. Dies ist allerdings nicht notwendig, da eine einzelne I2C-Schnittstelle so zu konfiguriert werden kann, dass damit auf beide Adressen geantwortet wird. [19, p 404] Der interne I2C-Bus, über den der Mikrocontroller die ICs als Master ansprechen kann, ist an zwei anderen I2C-fähigen Pins angeschlossen. Hier sind Pull-Ups als DNP vorgesehen. Soll das FRED direkt die ICs ansprechen, sind am internen Bus durch das FRED schon Pull-Ups vorhanden. Wird die Retrofit-Lösung verwendet, müssen hier aber noch Pull-Ups eingefügt werden, da der interne I2C-Bus ansonsten keine hat.

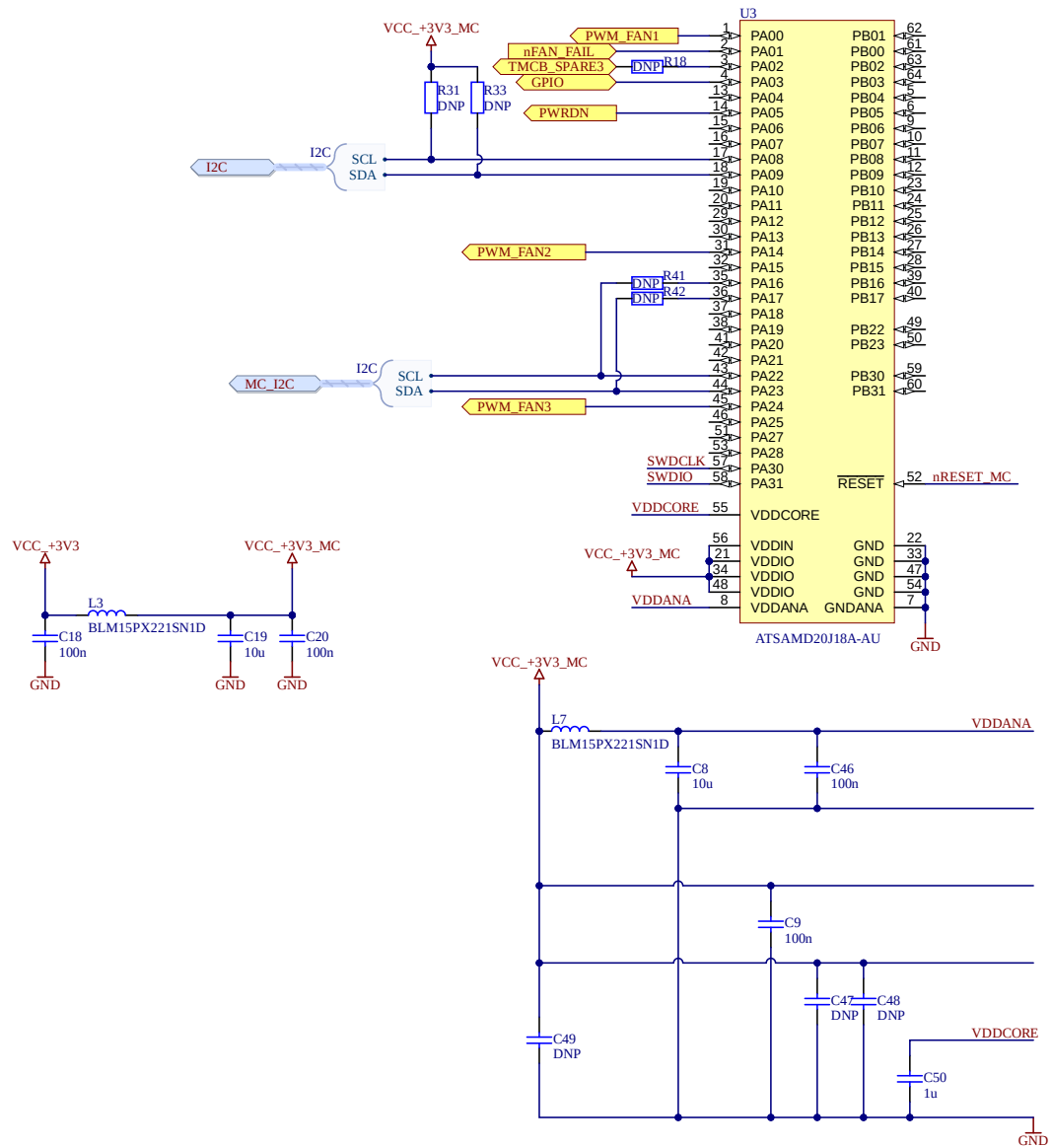


Abbildung 5.10: Schaltplan Microcontroller erstellt mit Altium Designer

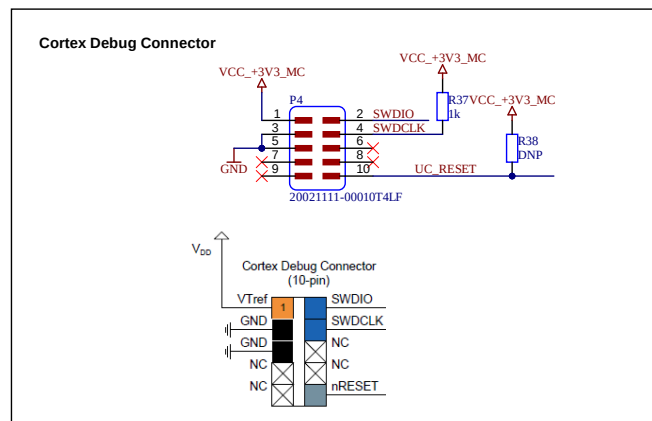


Abbildung 5.11: Teil Cortex Debug Connector von Schaltplan Microcontroller erstellt mit Altium Designer

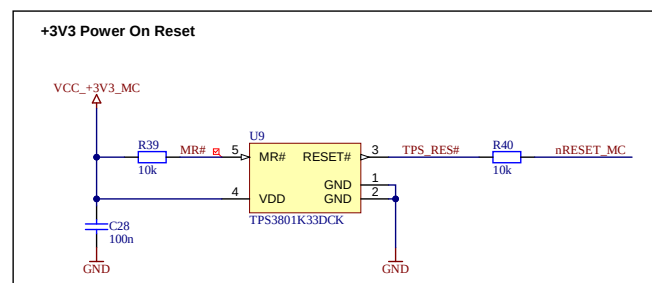


Abbildung 5.12: Teil Microcontroller von Schaltplan Microcontroller erstellt mit Altium Designer

Der Cortex Debug Connector (Abbildung 5.11) ist entsprechend den Vorgaben aus dem Datenblatt [19, p 705] angeschlossen. Darüber kann der Mikrocontroller programmiert und Debugging betrieben werden.

Im Block +3V3 Power On Reset (Abbildung 5.12) wird wie im alten System ein Bauteil verwendet, welches dem Erzeugen sauberer Resetpulse dient (TPS3801 [25]). Sobald die Spannung eingeschaltet wird, überwacht der Baustein die Versorgungsspannung und zieht die Resetleitung des Mikrocontrollers auf Low, sobald die Versorgungsspannung vollständig und stabil anliegt. Bei weiteren Einbrüchen der Versorgungsspannung wird erneut ein Resetpuls erzeugt, wenn diese wieder stabil ist. So wird sichergestellt, dass der Mikrocontroller seit seinem letzten Reset nur stabile Versorgungsspannung erfahren hat.

5.2 Prototyp

Um das Konzept und den Schaltplan zu testen, werden die wesentlichen Teile der Schaltung auf einer Lochrasterplatine als Prototyp aufgebaut. Dazu stehen der Power Monitor und Fan-Speed Controller IC auf Adapterplatinen zur Verfügung. Diese ermöglichen das einfache Aufstecken auf fest angelötete Sockelleisten. Außerdem sind auf den Adapterplatinen Pull-Ups, Kondensatoren oder Shunt-Widerstände für die Pins angebracht, die diese benötigen. Der Mikrocontroller steht auf dem SAM D20 Xplained Pro Evaluationsboard [5] zur Verfügung und kann über die serielle Schnittstelle via USB vom PC aus programmiert werden, sodass nur noch Versorgungsspannung und I2C-Pins angeschlossen werden müssen. Auf die Inhalte des InputOutput-Plans wird für den Prototypen vollständig verzichtet, weil diese nicht zum Betrieb der Lüftersteuerung benötigt werden. Außerdem werden 12 V direkt über einen Stecker von einem einstellbaren Netzgerät eingespeist. Deshalb entfallen auch die linearen Spannungsregler. Die 3,3 V und 12 V-Spannungen werden mit einem gemeinsamen Ground betrieben. Dazu versorgt der zweite Kanal des Netzgeräts das Evaluationsboard mit 5V, wobei die Grounds der beiden Kanäle zusammengeschlossen werden. Das Evaluationsboard wiederum versorgt die Platine mit Spannung, indem Masse und 3,3 V-Pin gemeinsam mit den I2C-Leitungen SCL und SDA mit vier steckbaren Drähten an eine Stiftleiste auf der Platine angeschlossen werden.

Auf der Lochrasterplatine werden die Bauteile auf der Oberseite platziert und auf der Unterseite Verbindungen gezogen. Die Verbindungen bestehen aus nicht isoliertem Silberdraht, oder den Anschlussdrähten der Bauteile, soweit dies sinnvoll möglich ist. Die übrigen Verbindungen sind mit isolierten Drähten hergestellt. Die über den Stecker eingespeiste 12 V Spannung wird direkt mit den drei SENSE+ Pins des Power Monitors verbunden. Auf der Adapterplatine sind Shuntwiderstände aufgelötet. Der EMV-Filter und die Transistorschaltung sind entsprechend des Schaltplans aufgebaut. Der Wert des 7,5 mF Kondensators beträgt für den Prototyp aufgrund der Bestellumstände stattdessen 8,2 mF. Diese Abweichung hat keine messbaren Unterschiede zur Folge. Die drei MOSFETS werden durch je eine Metallklammer an einen gemeinsamen Kühlkörper geklemmt. Dieser ist mit drei Schrauben an der Platine befestigt. Durch eine Wärmeleitfolie sind die Transistoren elektrisch, aber nicht thermisch vom Kühlkörper isoliert. Die Lüfter werden über die im Design verwendeten Stecker angeschlossen. Zusätzlich sind Messpunkte für den Ground und die drei Tacholeitungen angebracht. Außerdem gibt es auf der Unterseite Stellen, an denen zwischen Drahtverbindungen und Platine genug Platz ist, um

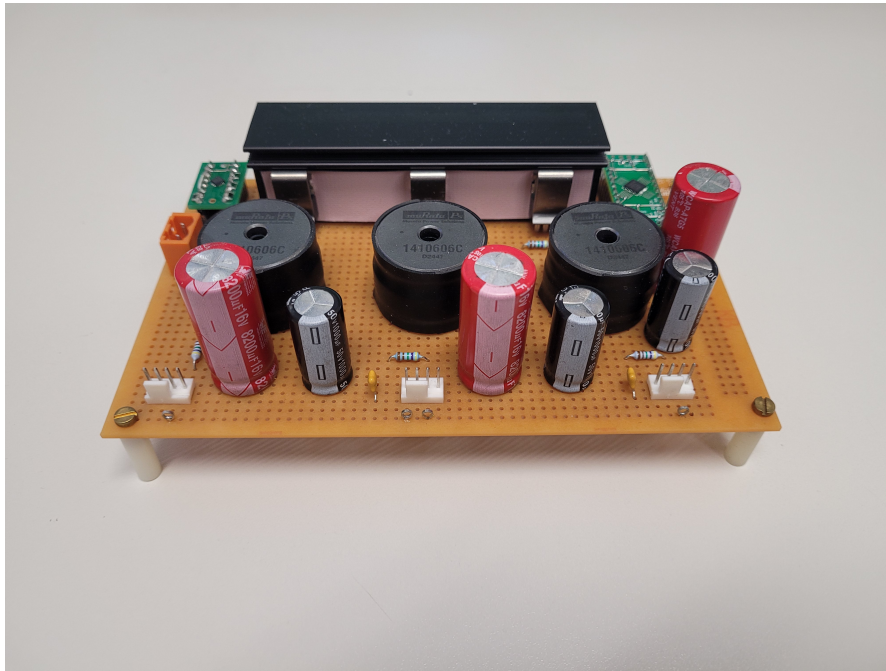


Abbildung 5.13: Prototyp Oberseite von vorne

einen Oszilloskop-Tastkopf anzuklemmen und zum Beispiel die Spannung am Transistorgate oder am Lüfter zu messen. In den Ecken der Platine sind vier Abstandshalter angeschraubt, sodass die Platine hingestellt werden kann. Die Platine ist in Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 aus verschiedenen Perspektiven dargestellt. In Abbildung 5.15 sind in der Draufsicht die Bauteile und Stecker beschriftet.

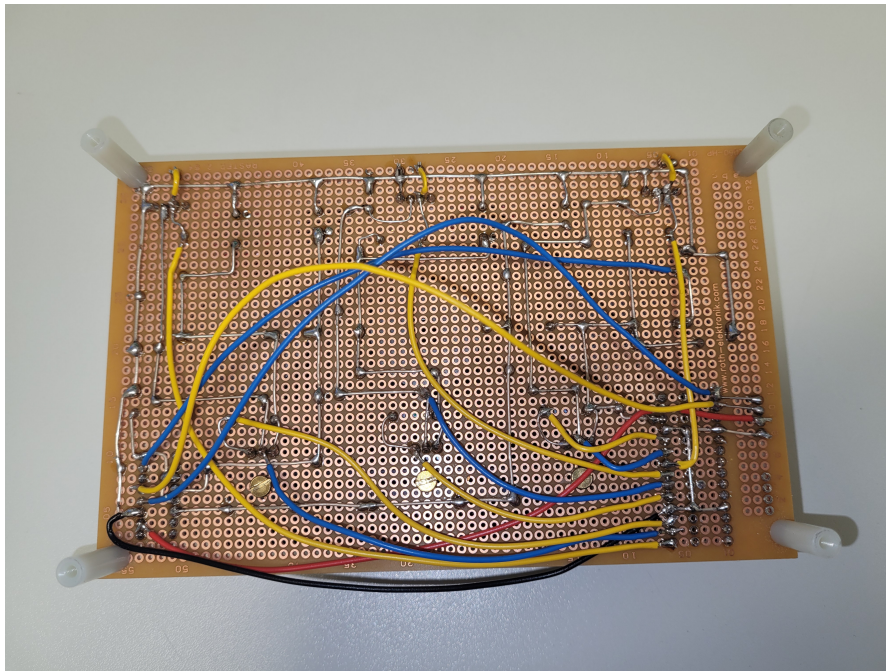


Abbildung 5.14: Prototyp Unterseite

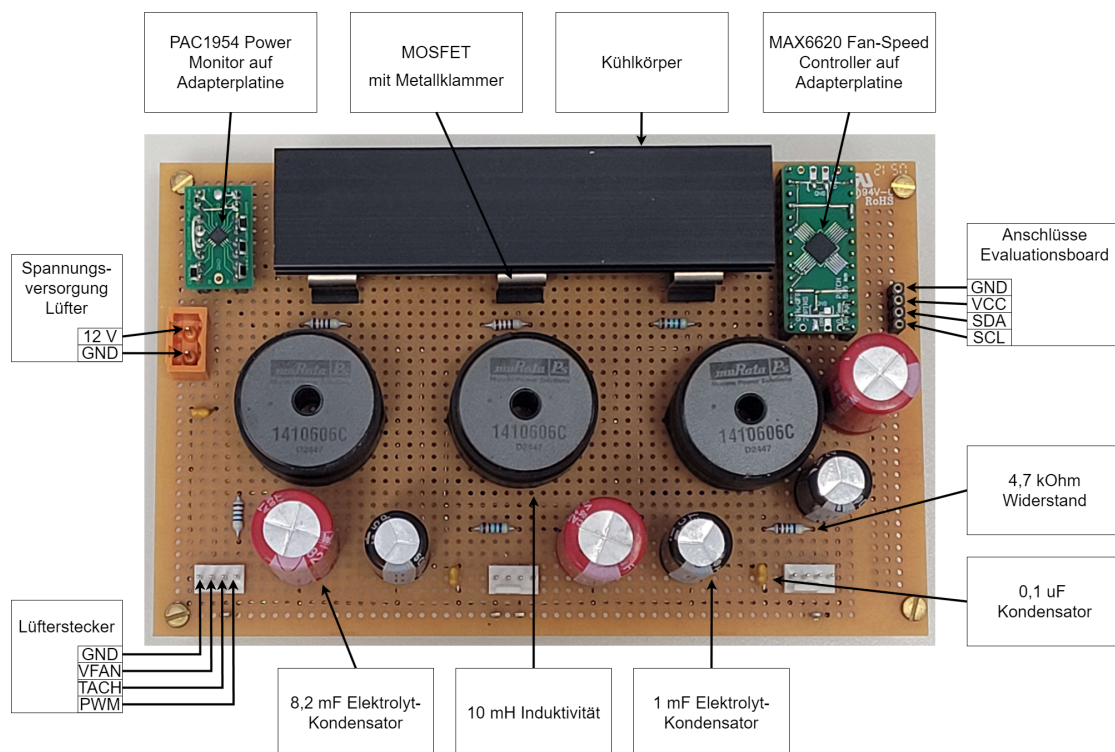


Abbildung 5.15: Prototyp mit Beschriftung der Bauteile

5.3 Software

Um den Power Monitor und den Fan-Speed Controller mit dem Mikrocontroller ansprechen zu können, wird für jeden der beiden ICs eine C-Quellcodedatei mit Funktionen und eine Headerdatei mit Funktionsprototypen und Makros erstellt. Dabei werden Bibliotheken für die I2C-Kommunikation verwendet. So können mit der Funktion `i2c_read` Daten gelesen und mit `i2c_write` geschrieben werden. Hier ist beispielhaft ein Aufruf gezeigt:

```
status = i2c_read(module, 0x29, 0x01, &data, 1);
```

Dabei muss als erstes Argument immer eine Referenz auf das verwendete I2C-Modul übergeben werden, wobei eine Struktur verwendet wird, die ebenfalls aus den verwendeten Bibliotheken stammt. Die hier übergebene Variable `module` muss vom Typ `struct i2c_master_module *const` sein. Das zweite Argument ist die I2C-Adresse des Slaves, der angesprochen werden soll. Im Beispiel wird `0x29` übergeben, was die Adresse des Fan-Speed Controllers ist. Normalerweise wird dafür im Code das Makro `FAN_ADDRESS` verwendet, welches diesen Wert hat. Das dritte Argument ist die Adresse des Registers, das geschrieben oder gelesen werden soll. Im Beispiel wird `0x01`, die Adresse des Fan Fault Registers, übergeben, die sonst im Code über das Makro `FAN_REG_FAULT` verwendet wird. Das vierte Argument ist ein Zeiger, welcher angibt, an welcher Speicherstelle die zu schreibenden Daten liegen, beziehungsweise wo die gelesenen Daten gespeichert werden sollen. Im Beispiel wird ein Zeiger auf die Variable `data` vom Typ `uint8_t` mittels des Adressoperators `&` übergeben. So wird das eine gelesene Byte in der Variablen `data` gespeichert. Sollen mehrere Bytes gelesen werden, kann stattdessen ein Array vom Typ `uint8_t` erstellt werden, dessen Länge der Anzahl zu lesender Bytes entspricht. Dann kann der Arrayname (ohne Adressoperator) übergeben werden, was einem Zeiger auf das erste Element entspricht. Die gelesenen Bytes werden dann nacheinander in diese und die nachfolgenden Speicherstellen geschrieben, sodass die Elemente des Arrays gefüllt werden. Das letzte Argument ist die Anzahl zu lesender oder schreibender Bytes. Im Beispiel ist dies `1`. Wird eine größere Zahl angegeben, werden auch die Register bei den nachfolgenden Adressen gelesen. Diese Funktion gibt einen Statuscode zurück, wobei ein Enum aus den Bibliotheken verwendet wird. Der Rückgabewert und die Variable `status`, die diesen speichert, sind vom Typ `status_code_genare_t`. Daran kann abgelesen werden, ob ein Fehler bei der Kommunikation aufgetreten ist und welcher. Bei `STATUS_OK` war die Übertragung erfolgreich.

Ein großer Teil der selbstgeschriebenen Funktionen für den Fan-Speed Controller dient dazu, einzelne Werte in den Registern einzustellen. Diese erhalten ebenfalls eine Referenz auf das I2C-Modul, um damit die I2C-Funktionen zum Lesen und Schreiben aufzurufen. Der Statuscode dieser Funktionen wird als Rückgabewert weitergegeben. In den Konfigurationsregistern der Fan-Speed Controllers sollen häufig nur einzelne Bits oder Gruppen von Bits geändert werden. In dem Fall wird erst der aktuelle Wert des Registers gelesen. Dann werden mittels Bitshift und bitweiser Operatoren und entsprechender Maskierung nur die zu ändernden Bits angepasst, ohne die übrigen zu verändern. Das veränderte Byte wird dann wieder in das gleiche Register zurückgeschrieben. Auf der anderen Seite erstrecken sich die Werte für Spannung und Drehzahl über mehrere Bytes. Um diese einzustellen, wird der übergebene Wert auf mehrere Bytes aufgeteilt und entsprechend verschoben und maskiert. Diese können dann nacheinander in die entsprechenden Register geschrieben werden. In den Funktionen zum Lesen dieser Werte werden umgekehrt die gelesenen Bytes zusammengesetzt. Einige Funktionen ändern nur die Einstellung für einen Kanal. In dem Fall wird die Nummer des Kanals übergeben. Um mit der Nummerierung im Datenblatt einheitlich zu bleiben, werden die Kanäle beim Übergabeparameter von 1 bis 4 nummeriert. Deshalb muss im Code zum Teil 1 abgezogen werden, um eine mit 0 beginnende Nummerierung zu erhalten. Für die Register, welche für jeden Kanal einzeln existieren, ist die Registeradresse für Kanal 1 als Makro implementiert. Um die Adresse des betrachteten Kanals zu erhalten, muss der korrekte Offset zur Adresse addiert werden. Das Register für Kanal 2 liegt eine Adresse weiter, oder für Spannungen und Drehzahlen zwei Adressen weiter, und die Kanäle 3 und 4 folgen dahinter im gleichen Abstand. Zusätzlich existieren Funktionen, um mehrere Kanäle gleichzeitig einzustellen. In dem Fall wird immer mit Kanal 1 gestartet und die Anzahl der Kanäle als Argument übergeben. Stattdessen könnte auch für jeden Kanal einzeln eine Funktion aufgerufen werden, aber in dem Fall würde jeweils eine neue I2C-Übertragung begonnen werden. Die Funktion für mehrere Kanäle hat den Vorteil, dass die aufeinanderfolgenden Register der Kanäle in einer Übertragung gelesen werden können.

Einige Funktionen verwenden keine I2C-Kommunikation, sondern dienen dazu, zwischen den Registerwerten für Spannung und Drehzahl und den entsprechenden Werten in V oder rpm umzurechnen. Außerdem gibt es noch Funktionen, die mehrere der anderen Funktionen kombinieren, um zum Beispiel für einen Kanal mehrere Einstellungen zu initialisieren und den Lüfter zu starten.

Für den Power Monitor dienen einige der Funktionen dazu, per I2C den Befehl zu geben, die Register mit den neuen Messwerten für Strom und Spannung zu aktualisieren und diese zu lesen. Außerdem gibt es Umrechnungsfunktionen, um zwischen Registerwerten und Strom und Spannung in A und V umzurechnen. Die Funktionen werden kombiniert, um Werte per I2C zu lesen und umzurechnen.

Zum Testen des Codes und des Prototypen wird ein bestehendes, DESY-internes C-Projekt verwendet. Dieses enthält unter anderem die Funktionen zur Verwendung von I2C, eine `main` mit Initialisierungen des Mikrocontrollers und ein Konsoleninterface. Dabei kommt das Atmel Software Framework ASF zum Einsatz (inzwischen als Advanced Software Framework bezeichnet). Dieses stellt Treiber und Code-Module zur Verfügung um die Verwendung von SAM Mikrocontrollern zu erleichtern [17]. Dem Projekt werden die eigenen Quellcode-Dateien hinzugefügt. Außerdem wird in den bestehenden Dateien eigener Quellcode ergänzt. In der `main` wird Code zur Initialisierung des Fan-Speed Controllers hinzugefügt. Dieser dient dazu, einmalig zu Beginn den Fan-Speed Controller zurückzusetzen und die Lüfter mit Standardwerten zu initialisieren und zu starten. Außerdem wird jede Sekunde der I2C-Watchdog des Fan-Speed Controllers zurückgesetzt.

Um den Prototyp zu testen, wird das bestehende Konsoleninterface verwendet. Dort werden zusätzliche Funktionen eingefügt, über welche der Fan-Speed Controller und Power Monitor angesprochen werden. Dazu wird jeweils ein Befehl und dessen Abkürzung, eine Beschreibung und eine Funktion angegeben. Wird der Befehl oder seine Abkürzung in der Konsole eingegeben, wird die Funktion aufgerufen. Dabei können durch Leerzeichen getrennte Parameter angegeben werden. Es werden einige Befehle hinzugefügt, um Power Monitor und Fan-Speed Controller anzusprechen und einzelne Funktionen zu testen. Außerdem werden Befehle hinzugefügt, welche an die Befehle angelehnt sind, mit denen das alte System per Konsole gesteuert wird, sodass diese besser verglichen werden können. Der Befehl `FbReadFansInfo` sorgt dafür, dass aktuelle Werte der Lüfter wie Drehzahl, Spannung und Strom gelesen und auf der Konsole ausgegeben werden. Mit dem Befehl `FbProgFan` kann die Spannung oder Drehzahl vorgegeben werden.

Ein Teil der Konsolenausgaben ist hier beispielhaft dargestellt:

```
SAMD20-XPRO> pf r 6000
SAMD20-XPRO> rfi
fanNr mode alarm current targetValue currentVoltage currentSpeed range
0 | R | 0 | 290.71 | 6030 | 251 | 6030 | 2
1 | R | 0 | 280.78 | 6030 | 252 | 5994 | 2
2 | R | 0 | 288.37 | 6030 | 258 | 6030 | 2
SAMD20-XPRO> rfi
fanNr mode alarm current targetValue currentVoltage currentSpeed range
0 | R | 0 | 289.79 | 6030 | 251 | 6030 | 2
1 | R | 0 | 280.25 | 6030 | 252 | 6030 | 2
2 | R | 0 | 287.93 | 6030 | 258 | 6068 | 2
SAMD20-XPRO> rfi
fanNr mode alarm current targetValue currentVoltage currentSpeed range
0 | R | 0 | 290.02 | 6030 | 250 | 6030 | 2
1 | R | 0 | 280.44 | 6030 | 252 | 6030 | 2
2 | R | 0 | 286.41 | 6030 | 258 | 6068 | 2
```

Der Name des Evaluationsboards wird als prompt angezeigt. Als Befehl wird zuerst `pf` eingegeben, was die Kurzform von `FbProgFan` ist, womit Spannung oder Drehzahl der Lüfter eingestellt werden kann. Das Argument `r` gibt an, dass die Drehzahl vorgegeben werden soll und `6000` ist die gewünschte Drehzahl in rpm. Der Befehl `rfi` ist die Kurzform von `FbReadFansInfo` und dient dem Auslesen des aktuellen Status. Für jeden der Lüfter wird als Modus `R` angezeigt, da die Drehzahl vorgegeben wird und es werden keine Alarme angezeigt, da kein Versagen der Lüfter erkannt wird. Es ist der vom Power Monitor gemessene Strom in mA angegeben. Der `targetValue` ist im `R`-Modus in rpm und unterscheidet sich vom vorgegebenen, da nur bestimmte Werte möglich sind. Die eingestellte Drehzahl wird in einen Registerwert umgewandelt, welcher auf den nächsten ganzen Wert gerundet werden muss. So sind nur bestimmte Drehzahlen einstellbar und beim Auslesen und Zurückrechnen des Registerwerts kann die von der Vorgabe leicht abweichende tatsächlich eingestellte Drehzahl abgelesen werden. Die aktuell ausgegebene Spannung wird als 9-Bit-Wert angegeben, wobei der Maximalwert 511 der maximalen Versorgungsspannung von 12 V und 0 der minimalen Versorgungsspannung von 0 V entspricht. Die aktuelle Drehzahl ist in rpm angegeben. Zudem ist die verwendete Speed Range angegeben, welche den Bereich und die Auflösung der einstellbaren und gemessenen Drehzahl bestimmt.

6 Verifikation

6.1 Inbetriebnahme des Prototyps

Vor dem Anlegen einer Versorgungsspannung wurde der Prototyp visuell auf Fehler im Aufbau der Schaltung untersucht. Dabei wurde unter anderem untersucht, dass die richtigen Pins der Stiftleisten und Transistoren mit den richtigen Teilen der Schaltung verbunden sind und dass die Elektrolytkondensatoren in der richtigen Polarität angeschlossen sind. Außerdem wurde mit einem Multimeter (VC850 [26]) geprüft, dass keine ungewollten Kurzschlüsse zwischen benachbarten Pins bestehen, und dass die Versorgungs- und I2C-Pins der IC-Sockel korrekt mit der Stiftleiste zum Mikrocontroller verbunden sind.

Da keine Fehler in der Schaltung festgestellt werden konnten, wurde im nächsten Schritt 3,3 V Spannung ohne 12 V Spannung angelegt. Dazu wird das Evaluationsboard des Mikrocontrollers durch ein Netzgerät mit 5 V versorgt. Die Pins für 3,3 V und GND sowie die I2C-Pins werden mit der dafür vorgesehenen Stiftleiste und damit auch den entsprechenden Pins der ICs verbunden. Der Mikrocontroller wird außerdem per USB an den PC angeschlossen, um ihn über die serielle Schnittstelle per Konsole anzusprechen. Nach einem Reset werden vom Mikrocontroller per I2C einmal alle möglichen 7-Bit-Adressen angesprochen und diejenigen auf der Konsole angezeigt, bei denen eine Antwort kommt. Dabei ist immer ein Device mit Adresse 0x28 auf dem Bus präsent. Dies ist die Standardadresse des Data Gateway Interface [4, p 6]. Dabei handelt es sich um ein Debug-Werkzeug, welches Teil des Atmel Embedded Debugger ist, der auf dem Evaluationsboard enthalten ist [5, p 7]. Dies ist nicht zu verwechseln mit der Adresse des Fan-Speed Controllers. Dieser kann ebenfalls die Adresse 0x28 haben, wenn der Adresspin auf Masse gezogen wird; beim Prototyp wird er aber offen gelassen, sodass die Adresse 0x29 ist. Beim Test mit 3,3 V Spannung, aber ohne 12 V Spannung, antwortet der Power Monitor mit Adresse 0x10 über I2C und die Adresse 0x28 des Programmers ist zu sehen, aber der Fan-Speed Controller antwortet nicht. Im Datenblatt ist als POR (Power On Reset) Threshold für VCC 2 V angegeben, was durch die 3,3 V Versorgungsspannung erfüllt ist

und 3,5 V für VFAN, was ohne die 12 V Versorgungsspannung der Lüfter nicht gegeben ist. Um den Fan-Speed Controller also ansprechen zu können, müssen mindestens 3,5 V am FAN-Pin anliegen. Die fehlende Antwort ist also kein Zeichen für einen beschädigten IC oder einen Fehler in der Schaltung. Mit dem Multimeter wird gemessen, dass tatsächlich die Versorgungsspannung an beiden ICs anliegt und dass der 12 V Teil spannungslos bleibt, also keine ungewollte Verbindung zwischen 3,3 V und 12 V besteht.

Um den 12 V Teil auch zu überprüfen, wird ohne Mikrocontroller und 3,3 V Spannung die 12 V Spannung vom Netzgerät über den Stecker eingespeist. Dabei wird eine Strombegrenzung von 10 mA verwendet. Sobald das Netzgerät angeschlossen wird, greift die Strombegrenzung und die Spannung bricht ein, da sich die Kondensatoren aufladen. Nach wenigen Sekunden sind die Kondensatoren so weit aufgeladen, dass die Strombegrenzung nicht mehr greift. Mit dem Multimeter wird geprüft, dass nur an den Stellen 12 V anliegen, an denen dies auch vorgesehen ist.

Um den Prototyp vollständig in Betrieb zu nehmen, werden beide Kanäle des Netzgeräts verwendet und die Massen miteinander verbunden. Das Netzgerät mit angeschlossenen Kabeln ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Zuerst werden, wie oben beschrieben, 5 V am Mikrocontroller angeschlossen, der damit die 3,3 V Versorgung bereitstellt. Damit vor dem Anschließen der 5 V das System nicht aus dem USB-Kabel gespeist wird, wird dieses erst nach Anlegen der 5 V angeschlossen. Die 12 V-Spannung wird auch erst nach der 5 V-Spannung angeschlossen, damit die ICs, insbesondere der Power Monitor, der auch ohne 12 V-Spannung funktioniert, sich initialisieren können, bevor weitere Spannungen angelegt werden. Der angeschlossene Prototyp ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Bei angeschlossener 12 V-Spannung antwortet auch der Fan-Speed Controller über I2C.

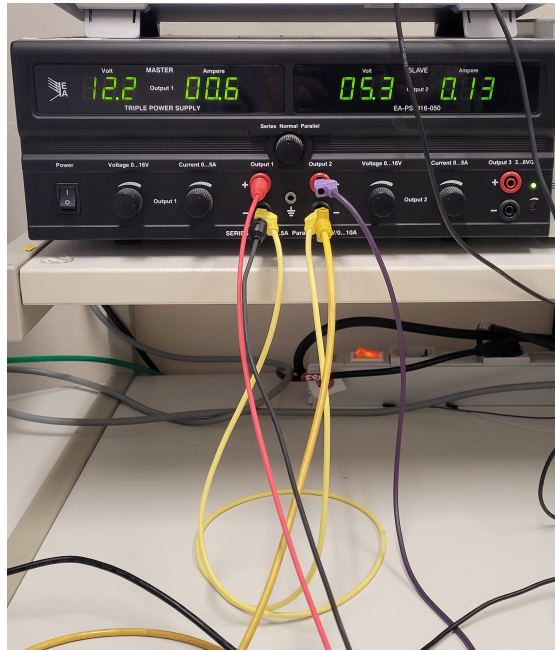


Abbildung 6.1: Netzgerät zur Versorgung des Prototyps: links Versorgung der Lüfter mit 12 V (rotes und schwarzes Kabel), rechts Versorgung des Evaluationsboards mit 5 V (blau und gelbes Kabel), Kopplung der Massen am Netzgerät (gelbes Kabel)

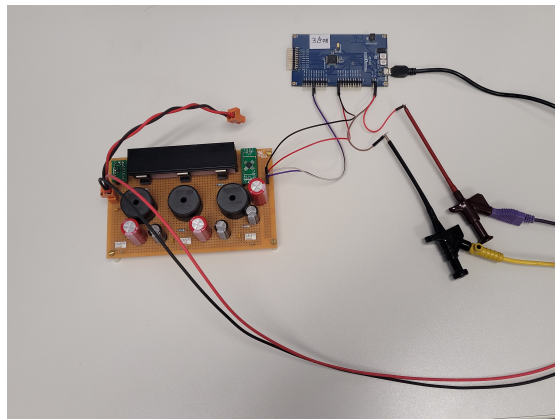


Abbildung 6.2: Prototyp mit angeschlossenem Evaluationsboard (I2C und 3,3 V), Versorgung (12 V für Lüfter und 5 V für Evaluationsboard) und Kommunikation (USB Kabel zum PC)

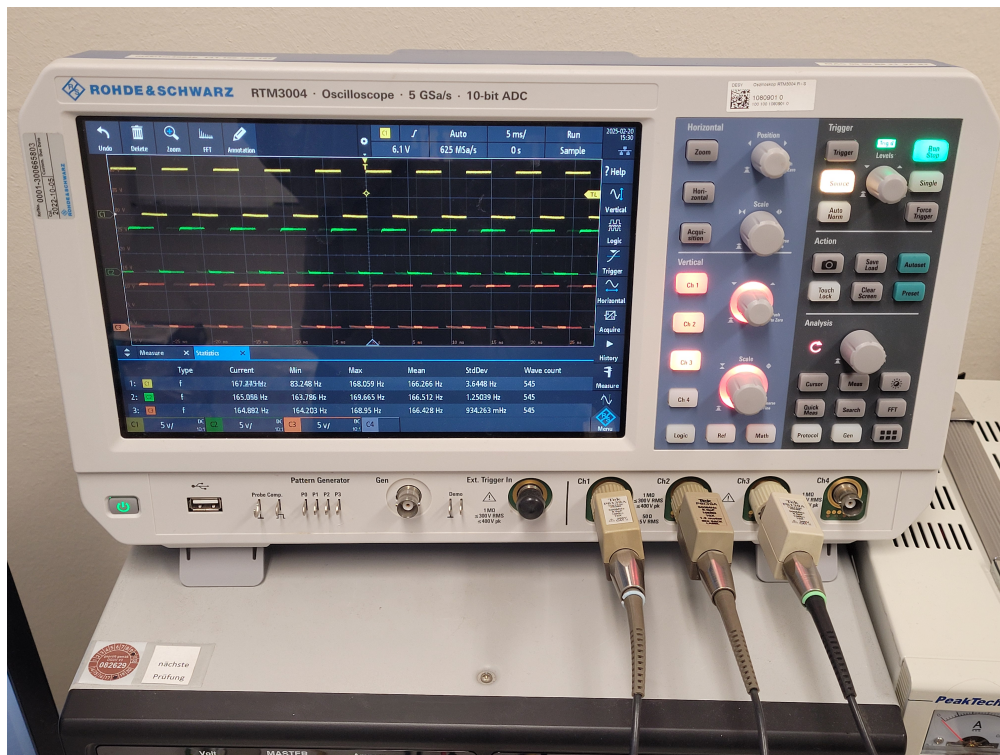


Abbildung 6.3: Oszilloskop mit angeschlossenen Tastköpfen zum Messen der drei Tacho-Signale der Lüfter

6.2 Test der Drehzahlregelung

Um die Drehzahlregelung zu testen, wird der Prototyp wie oben beschrieben in Betrieb genommen. Mit dem Oszilloskop [20] und drei Tastköpfen werden die drei Tacho-Signale aufgenommen und jeweils die Frequenz gemessen. Das Oszilloskop ist in Abbildung 6.3 und der angeschlossene Prototyp in Abbildung 6.4 dargestellt. Weil die Lüfter zwei Tachoperioden pro Umdrehung erzeugen, muss die Frequenz des Tachosignals durch 2 geteilt werden, um die Drehfrequenz zu erhalten. Um diese von Umdrehungen pro Sekunde zu Umdrehungen pro Minute umzurechnen, muss mit 60 multipliziert werden. Also kann die Drehzahl in rpm durch Multiplikation mit $30 \frac{\text{rpm}}{\text{Hz}}$ ermittelt werden. Das Oszilloskop liefert neben der aktuellen Frequenz auch eine Statistik mit minimaler, maximaler und durchschnittlicher Frequenz sowie der Standardabweichung. In Abbildung 6.5 ist beispielhaft ein Oszilloskop-Bild für 6000 rpm gezeigt.

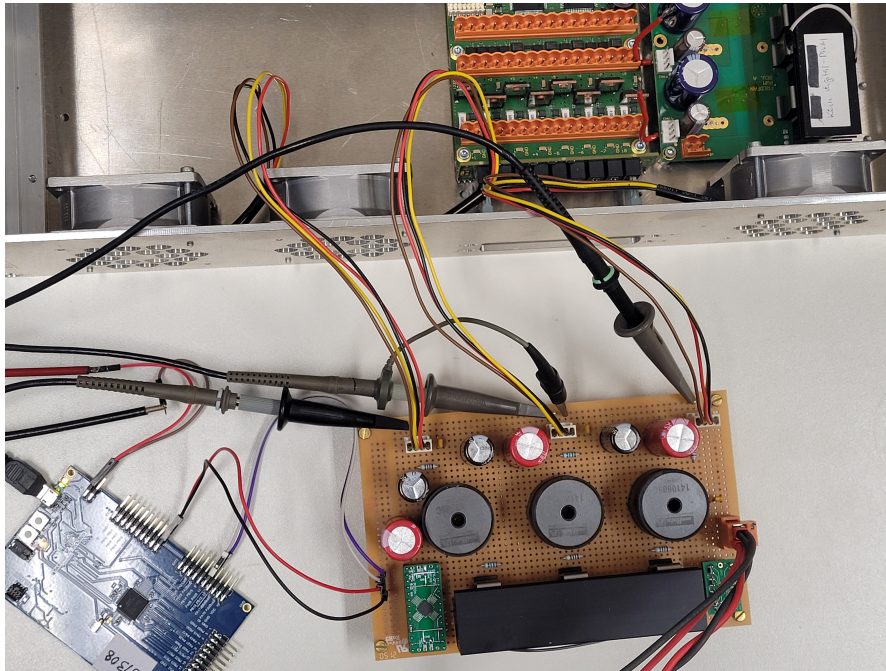


Abbildung 6.4: Prototyp mit angeschlossenen Lüftern und Tastköpfen zur Untersuchung der Drehzahlregelung durch Messung der Tacho-Signale

Es wird jeweils per Konsole eine Drehzahl eingestellt, beginnend mit 10 000 rpm und in 500er Schritten absteigend bis 500 rpm. Für jeden vorgegebenen Wert wird die Statistik der Frequenzmessung zurückgesetzt und abgewartet, dass die Werte ungefähr stabil bleiben, bevor die Ergebnisse übernommen werden. Außerdem wird in der Konsole im Abstand von 1 bis 2 Sekunden 10 mal der Status der Lüfter abgefragt und für die Auswertung gespeichert. Die Messung wird mit konstanten Werten für die Dynamik-Parameter DAC Rate-of-Change und Speed Range des Fan-Speed Controllers durchgeführt. Der Wert DAC Rate-of-Change bestimmt, in welchem zeitlichen Abstand die Spannungsvorgabe für den Lüfter geändert wird. Dieser Wert kann für jeden Kanal separat eingestellt werden. Es stehen 3 Bit zur Verfügung, sodass Werte von 0 (sofortige Änderung) bis 7 (maximaler Zeitabstand). Der Wert wird auf 7 gesetzt, was 1 s entspricht.



Abbildung 6.5: Tacho-Signale der drei Kanäle mit Messung und Statistik der Frequenzen bei 6000 rpm

Der Wert Speed Range bestimmt, wie viele Tachoperioden für einen Drehzahlmesswert ausgewertet werden. Bis die entsprechende Anzahl an Tacho-Pulsen erkannt wurde, werden die internen 8192 Hz Taktzyklen mit einem 11-Bit-Zähler gezählt, um daraus die Drehzahl zurückzurechnen. Um die Drehzahl möglichst genau zu bestimmen, muss der Bereich des Zählers möglichst gut ausgenutzt werden, indem mehr Tacho-Perioden abgewartet werden. Aber der Zähler darf nicht den Maximalwert 2047 erreichen, da die Drehzahl dann nicht mehr bestimmt werden kann und der Lüfter nur noch als stehend erkannt wird. Hier wird der Wert 2 verwendet, um auch niedrige Drehzahlen bis 500 rpm untersuchen zu können.

In Tabelle A.1 im Anhang sind die Ergebnisse der Drehzahlmessung aufgeführt. Zu jedem Wert, der mit der Konsole als Drehzahl vorgegeben wurde, sind die in rpm umgerechneten Statistiken des Oszilloskops für die Frequenzmessung angegeben. Es ist zu erkennen, dass im unteren Drehzahlbereich die Standardabweichungen und die Abstände zwischen Minimal- und Maximalwerten sehr viel größer sind als im oberen Drehzahlbereich. Im Bereich von 4000 rpm und darunter treten Schwankungen der Drehzahl auf, die an den Tacho-Signalen als sich ändernde Frequenz deutlich sichtbar und an den Lüftern selbst deutlich hörbar sind. Diese Schwankungen sind umso größer, je kleiner die eingestellte Drehzahl ist, und werden in der Statistik durch die großen Standardabweichungen und weit auseinanderliegenden Minimal- und Maximalwerte sichtbar. Für 500 rpm konnten keine aussagekräftigen Messwerte aufgenommen werden, da sich die Lüfter an der Grenze zum Stehenbleiben bewegen und das Tachosignal immer wieder aussetzt. Dieses Verhalten macht das System für den unteren Drehzahlbereich unbrauchbar. Deshalb muss untersucht werden, wieso diese Schwankung auftritt und ob dies verhindert werden kann. Trotzdem sollen die aufgenommenen Drehzahlmesswerte zunächst weiter untersucht und mit dem Altsystem verglichen werden, wobei hauptsächlich der obere Drehzahlbereich betrachtet wird, in dem keine starken Schwankungen auftreten.

Für das alte System wurden Messwerte für Drehzahlen von 500 rpm bis 10 000 rpm in Tabelle A.2 aufgenommen. Dabei wurden, wie beim neuen System, über die Konsole Werte vorgegeben und die Tachosignale der drei Lüfter mit dem Oszilloskop ausgewertet. Beim alten System wurden im Bereich von 500 rpm bis 1000 rpm Werte im Abstand von 50 rpm aufgenommen. Selbst in diesem Bereich kommt es nicht zu einer solchen Schwankung wie beim neuen System.

In Abbildung 6.6 sind die Mittelwerte aus Tabelle A.1 und A.2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die mittleren Drehzahlen beim neuen System im Allgemeinen näher an der Vorgabe und untereinander näher zusammenliegen, als beim alten System. Im Bereich unter 4000 rpm weichen die Werte des neuen Systems zum Teil stärker ab, allerdings sind die Mittelwerte in diesem Bereich aufgrund der schwankenden Drehzahl ohnehin wenig aussagekräftig, was die Qualität der Regelung betrifft. Bei höheren Drehzahlen ist hingegen deutlich zu erkennen, dass mindestens zwei und teilweise auch alle drei Kanäle des alten Systems stärker von der Vorgabe abweichen als einer der Kanäle des neuen Systems. Um dies besser vergleichen zu können, sind in Abbildung 6.7 die Beträge der relativen Abweichung der Mittelwerte von der Drehzahlvorgabe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass oberhalb von 4000 rpm nur der Wert von Kanal 2 des alten Systems bei

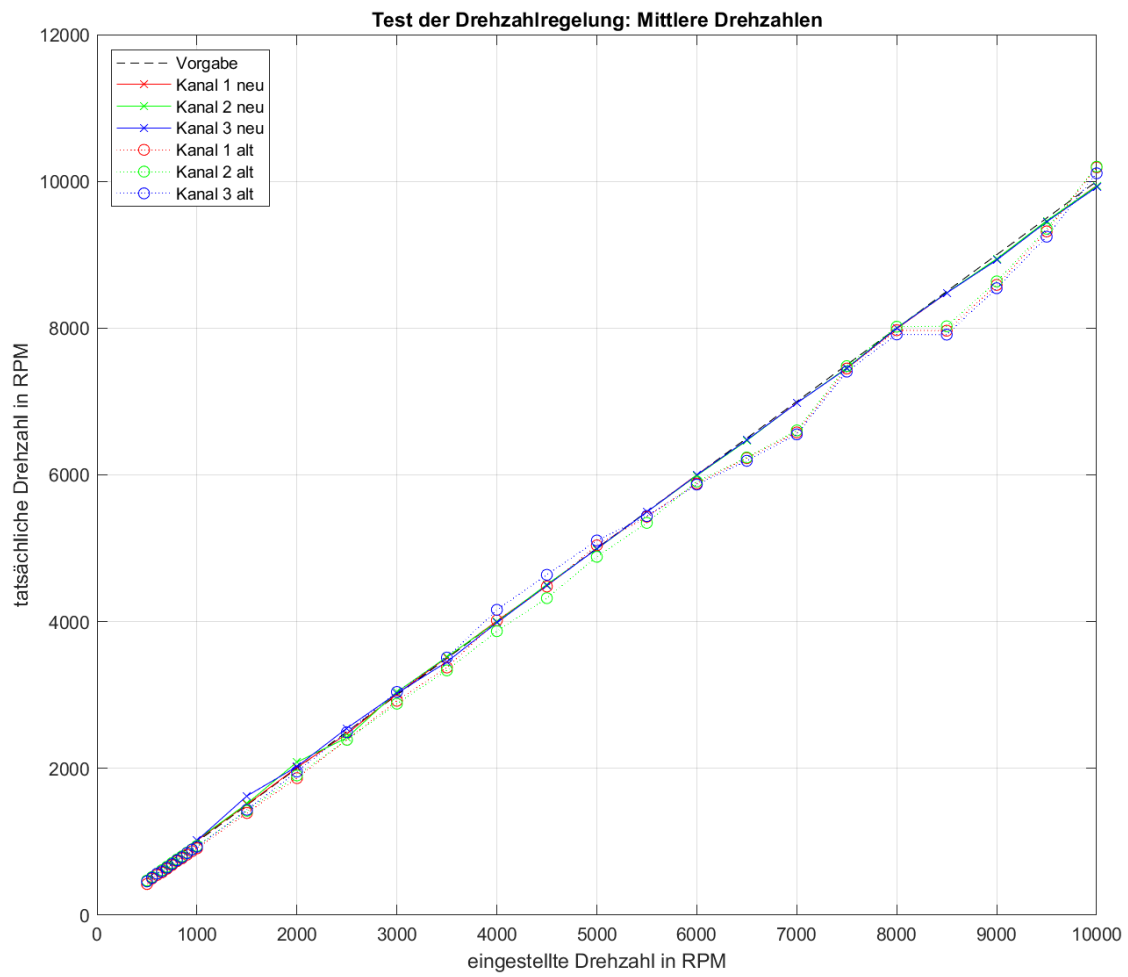


Abbildung 6.6: Mittlere Drehzahlen von altem und neuem System bei verschiedenen Vorgaben

7500rpm eine geringere Abweichung als das neue System erreicht. Ansonsten sind die Abweichungen beim alten System meist deutlich größer, zum Teil mehr als 5 %.

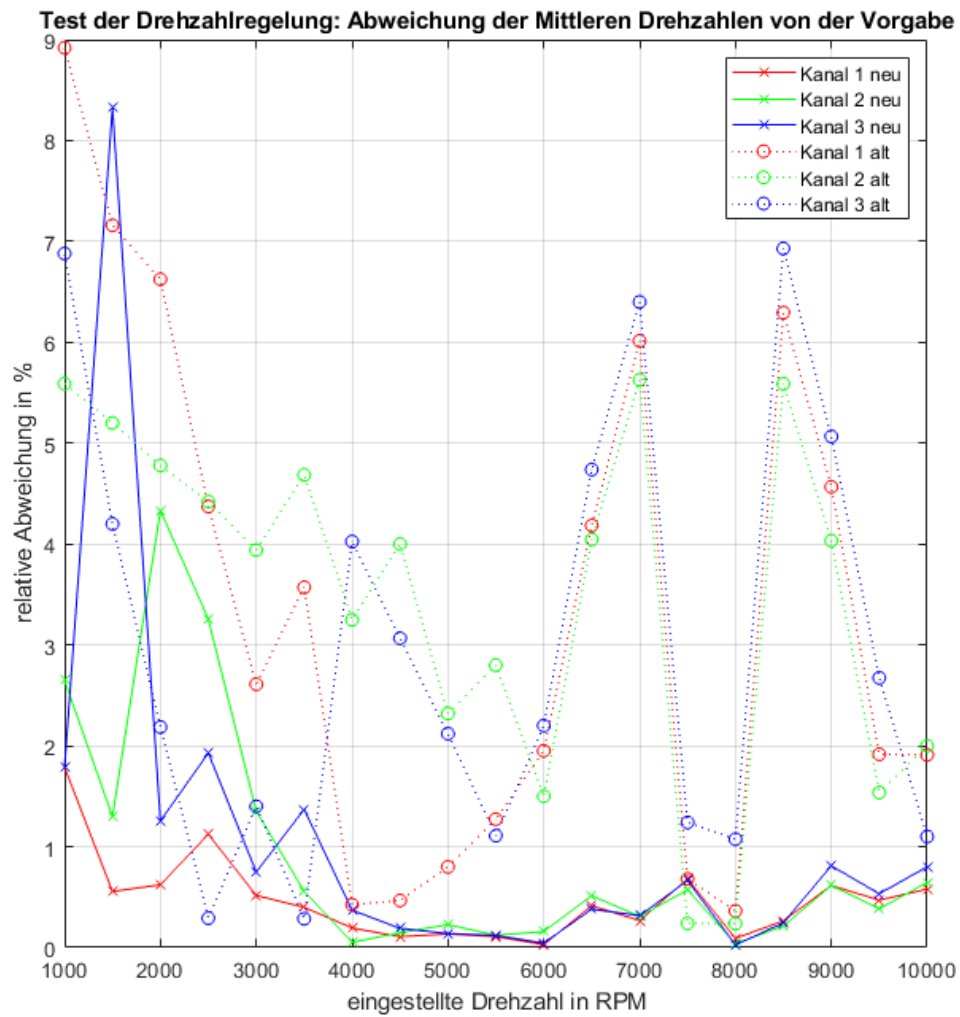


Abbildung 6.7: Beträge der relativen Abweichung der mittleren Drehzahlen von der Vorgabe bei altem und neuem System

Noch wichtiger als die Abweichung von der Vorgabe sind die Abweichungen der einzelnen Lüfter untereinander. Um diese zu untersuchen, werden die Beträge der Differenz zwischen den Drehzahlen zweier Kanäle ins Verhältnis zur eingestellten Drehzahl gesetzt. Diese Abweichungen untereinander sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Im Bereich unter 4000 rpm treten auch beim neuen System große Abweichungen zwischen den Drehzahlen der einzelnen Kanäle auf. Bei höheren Drehzahlen sind die Abweichungen des neuen Systems deutlich geringer als im unteren Bereich und bis auf einen einzelnen Wert (Abweichung Kanal 1 zu 2 bei 10 000 rpm) liegen die Abweichungen des alten Systems deutlich darüber.

In Abbildung 6.9 sind die Standardabweichungen der Drehzahl für altes und neues System dargestellt. Aufgrund der Drehzahlschwankung im unteren Bereich treten dort beim neuen System hohe Standardabweichungen auf, besonders bis einschließlich 4000 rpm. Bei 5500 rpm erreicht die Standardabweichung das Niveau, welches auch bei allen höheren Drehzahlen ungefähr beibehalten wird und um 10 rpm liegt. Bei der Standardabweichung des alten Systems geht der Trend eher in die andere Richtung. Höhere Standardabweichungen treten bei höheren Drehzahlen auf. Auch bei hohen Drehzahlen erreichen die Standardabweichungen des Altsystems jedoch nicht die des neuen bei niedrigen Drehzahlen. Der einzelne große Wert für Kanal 2 des Altsystems bei 3500 rpm ist vermutlich auf eine fehlerhafte Bestimmung einiger Frequenzen durch das Oszilloskop, die die Statistik stark verfälschen, zurückzuführen. Das Tachosignal des alten Systems hat einen unsauberen, gestörten Low-Pegel. Das liegt daran, dass beim alten System zur Einstellung der Spannung, die über den Lüfter anliegt, nicht der Pegel der Versorgungsspannung abgesenkt, sondern der Pegel am Masseanschluss des Lüfters angehoben wird. Der Lüfter kann das Tacho-Signal beim Low-Pegel nicht auf Masse ziehen, sondern nur auf die sich ändernde Spannung seines Massepins. Da diese hohe Standardabweichung nur bei einem Kanal und einer Drehzahl auftritt und sich klar vom sonstigen Trend abhebt, kann von einem Messfehler ausgegangen werden. Dann zeigt sich klar, dass das alte System im unteren Bereich die Drehzahl stabiler hält, mit einer geringeren Standardabweichung, und im oberen Bereich das neue System bessere Werte liefert.

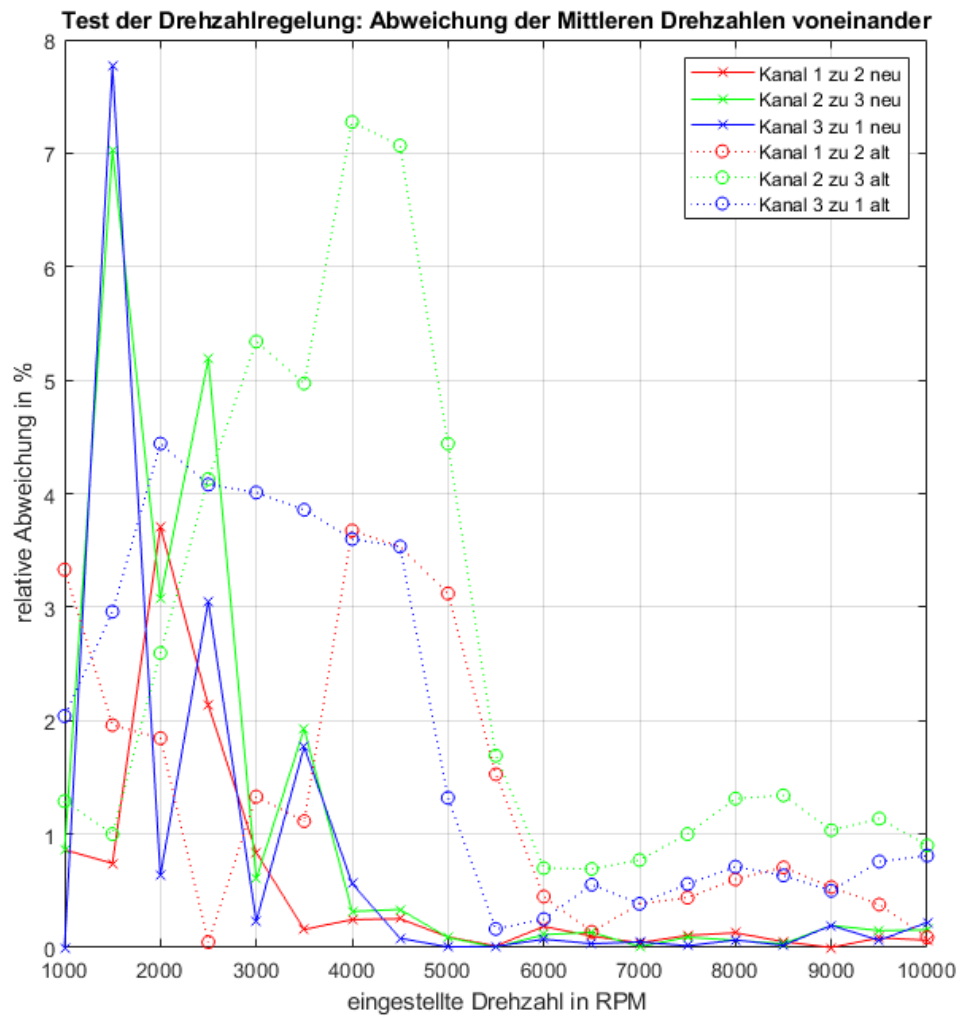


Abbildung 6.8: Betragliche Abweichung der mittleren Drehzahlen zwischen zwei Kanälen geteilt durch die vorgegebene Drehzahl bei altem und neuem System

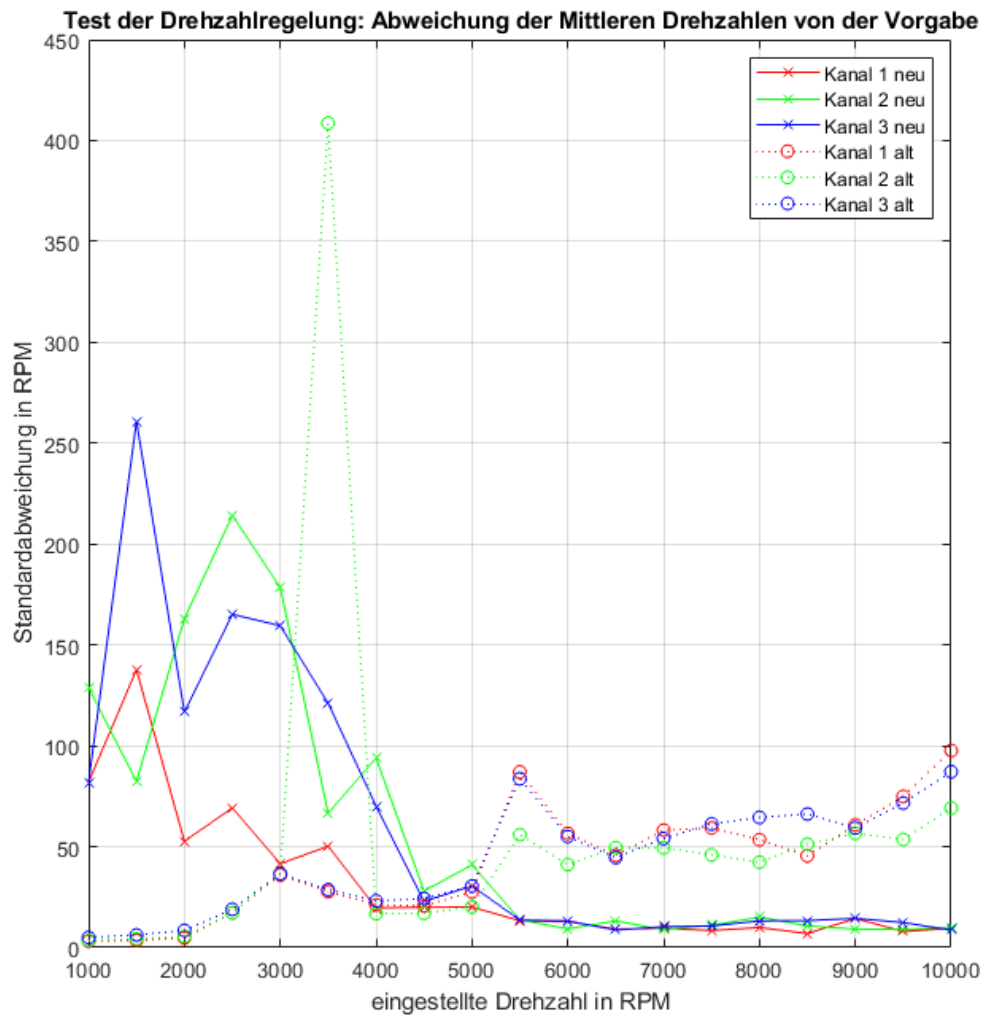


Abbildung 6.9: Standardabweichung der Drehzahlen bei altem und neuem System

6.3 Untersuchung der Schwankung bei niedrigen Drehzahlen

Um zu untersuchen, wieso es im unteren Drehzahlbereich zu Schwankungen kommt, wird ein Kanal allein betrachtet. Es werden zusätzlich zu dem Tachosignal auch die Spannungen am DACOUT Pin (Gate des MOSFET) und DACFB Pin (Drain des MOSFET und Versorgungsspannung des Lüfters) mit dem Oszilloskop gemessen. Der Fan-Speed Controller wird anstatt im RPM Modus im DAC Modus betrieben, sodass nicht auf eine Drehzahl geregelt, sondern eine feste Spannung eingestellt wird. Dabei stehen Werte von 0 bis 511 zur Verfügung. Damit wird die Spannung vorgegeben, die am DACFB Pin und am Lüfter anliegen soll, und über den DACOUT Pin wird das Gate des MOSFETs eingestellt, um diese Spannung zu erreichen. Aus den im Datenblatt [2] gegebenen Beispielwerten kann abgeleitet werden, dass 1 Bit Unterschied einer Spannungsänderung von 0,022 43 V entsprechen soll, mit der maximalen Spannung von 11,462 V bei Wert 511. Es soll untersucht werden, ob die tatsächlich gemessenen Spannungen dem entsprechen und welche Drehzahlen bei verschiedenen Spannungen auftreten.

In Tabelle 6.1 sind für verschiedene Werte der Register für die Spannungsvorgabe die mit dem Oszilloskop aus dem Tacho-Signal bestimmte Drehzahl, sowie die gemessene Spannung am DACFB-Pin, gegenübergestellt mit der nach dem Datenblatt zu erwartenden Spannung, und die Spannung am Transistorgate angegeben. In Abbildung 6.10 ist die Drehzahl in Abhängigkeit vom Registerwert für die Spannung grafisch dargestellt. Es fällt auf, dass die Kurve im unteren Bereich eine deutlich größere Steigung hat als im oberen. Im Bereich von Vorgabe 230 und Drehzahl 5500 rpm und darüber ist der Verlauf annähernd linear. Zwischen zwei Registerwerten liegen in diesem circa 17 rpm. Im Bereich von Vorgabe 210 und Drehzahl 4000 rpm und darunter ist die Kurve ebenfalls annähernd linear, aber hier liegen zwischen zwei Registerwerten um die 200 rpm. Dazwischen knickt die Kurve ab.

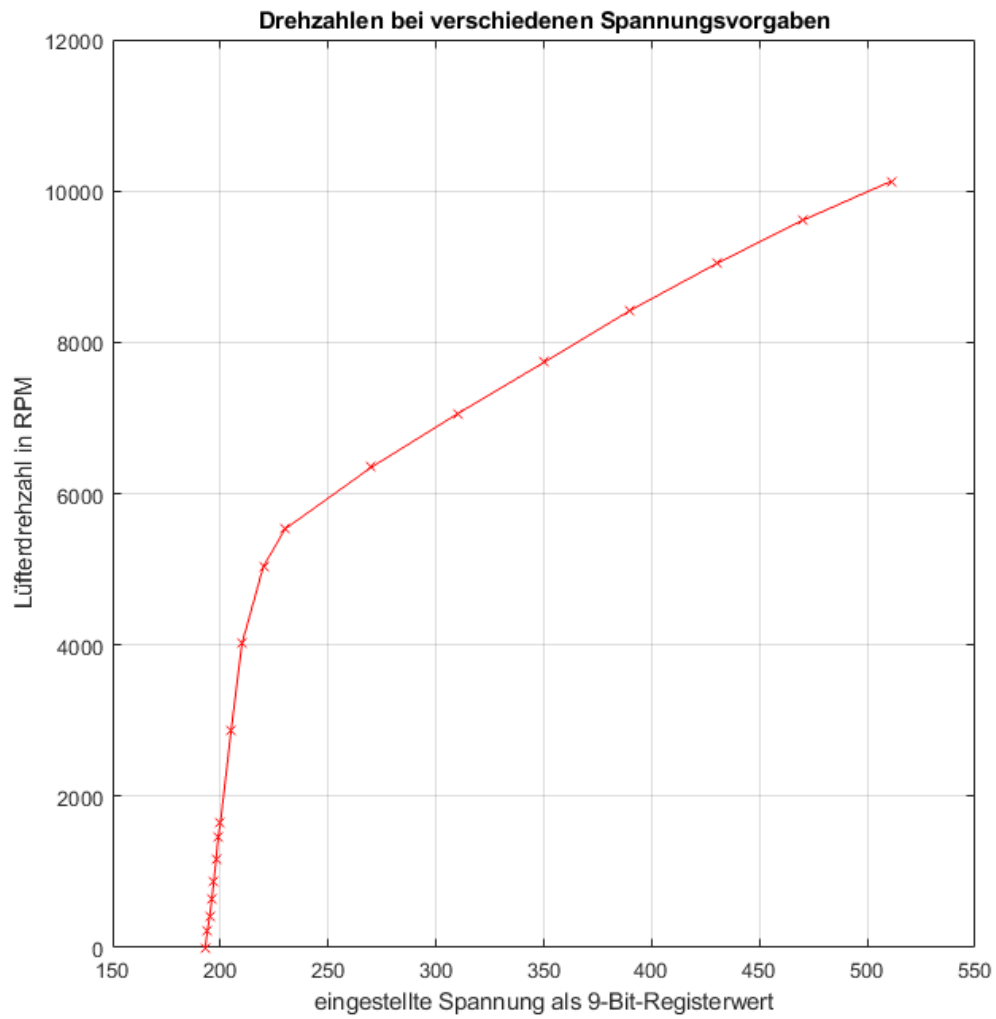


Abbildung 6.10: Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit von der vorgegebenen Spannung als 9-Bit-Wert

Tabelle 6.1: Spannungen und Drehzahlen im DAC-Modus

Registerwert 9-Bit	Drehzahl in rpm	V_{fan} in V	V_{soll} in V	V_{gate} in V
511	10128	10.530	11.46173	8.522
470	9612	9.759	10.54210	8.642
430	9039	9.012	9.64490	8.767
390	8421	8.251	8.74770	8.903
350	7734	7.475	7.85050	9.072
310	7056	6.684	6.95330	9.219
270	6348	5.875	6.05610	9.340
230	5532	5.049	5.15890	9.468
220	5040	4.855	4.93460	9.544
210	4017	4.694	4.71030	9.708
205	2871	4.635	4.59815	9.899
200	1641	4.587	4.48600	10.097
199	1461	4.567	4.46357	10.139
198	1158	4.553	4.44114	10.167
197	879	4.526	4.41871	10.198
196	633	4.508	4.39628	10.219
195	408	4.493	4.37385	10.224
194	222	4.474	4.35142	10.241
193	0	4.454	4.32899	10.402

Es sind klare Parallelen zu den oben betrachteten Standardabweichungen der Drehzahlregelung zu erkennen. Im Bereich der großen Steigung unterhalb von 4000 rpm treten starke Drehzahlschwankungen und damit hohe Standardabweichungen auf. Im Bereich der geringen Steigung ab 5500 rpm wird die Drehzahl stabil geregelt und die Standardabweichungen sind gering und annähernd konstant. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Drehzahlschwankung und den großen Drehzahlunterschieden, die im unteren Bereich zwischen den einstellbaren Spannungen liegen. Das ist schlüssig, da der Fan-Speed Controller auch bei der Drehzahlregelung nur diese einstellbaren Spannungswerte zur Verfügung hat. Wenn die eine Spannungsvorgabe eine zu geringe Drehzahl liefert, muss der Fan-Speed Controller die Spannung erhöhen, was in diesem Bereich zu einer sehr viel höheren Drehzahl führt. Ist diese höher als die Vorgabe, muss der Fan-Speed Controller die Spannung wieder senken, wodurch die Drehzahl wieder stark sinkt und wieder unterhalb der Vorgabe liegt. So kommt es zu einer starken Schwankung um die Vorgabe.

Je geringer der Dynamikparameter DAC Rate-of-Change eingestellt ist, desto schneller kann der Fan-Speed Controller die Spannung von einem Wert zum nächsten erhöhen. Da der Lüfter aufgrund seiner Trägheit Zeit benötigt, bis die Drehzahl der Spannungsänderung folgt, wird der Fan-Speed Controller bei geringerer Rate-of-Change die Spannung um mehrere Schritte ändern. Es kommt zu einem Überschwingen der Regelung und einer daraus resultierenden Reglerszillation. Daher wird die Schwankung umso größer, je geringer Rate-of-Change eingestellt ist, da die Spannung schneller geändert wird und deshalb der Überschwinger größer ist. Für die Untersuchung der Drehzahlregelung wurde der maximale Rate-of-Change Wert verwendet. Trotzdem kommt es im unteren Bereich zu starken Schwankungen, da die Drehzahl viel zu empfindlich auf kleine Spannungsänderungen reagiert, um diese stabil zu regeln. Im oberen Bereich hingegen kann die Drehzahl in deutlich kleineren Schritten eingestellt und deshalb auch stabil geregelt werden.

In Abbildung 6.11 sind die Spannungen aus Tabelle 6.1 dargestellt. Der Verlauf von V_{soll} zeigt den theoretisch linearen Verlauf der Lüfterspannung, proportional zu dem Registerwert. Die tatsächlich gemessene Spannung V_{fan} folgt dem ungefähr. Über den größten Bereich, steigt die Spannung annähernd linear, nur mit einer etwas geringeren Steigung als die Vorgabe, sodass diese bei größeren Spannungen immer weiter auseinanderliegen. Im unteren Bereich ist der Zusammenhang ebenfalls annähernd linear, mit einer ähnlichen Steigung. Dazwischen, im Bereich 200 bis 220, ist die Steigung etwas geringer. Die Spannung am Transistorgate wird im oberen Bereich annähernd linear gesenkt, um den MOSFET mehr durchzuschalten und die Lüfterspannung zu erhöhen. Im unteren Bereich ist der Verlauf nicht linear und die Gate-Spannung muss stärker abgesenkt werden, um die Lüfterspannung zu erhöhen. Es ist also auch bei den gemessenen Spannungen ein anderes Verhalten im unteren Bereich zu beobachten. Trotzdem ist der Verlauf der Versorgungsspannung in Abhängigkeit vom Registerwert annähernd linear und zeigt nicht eine stark unterschiedliche Spannung im oberen und unteren Bereich.

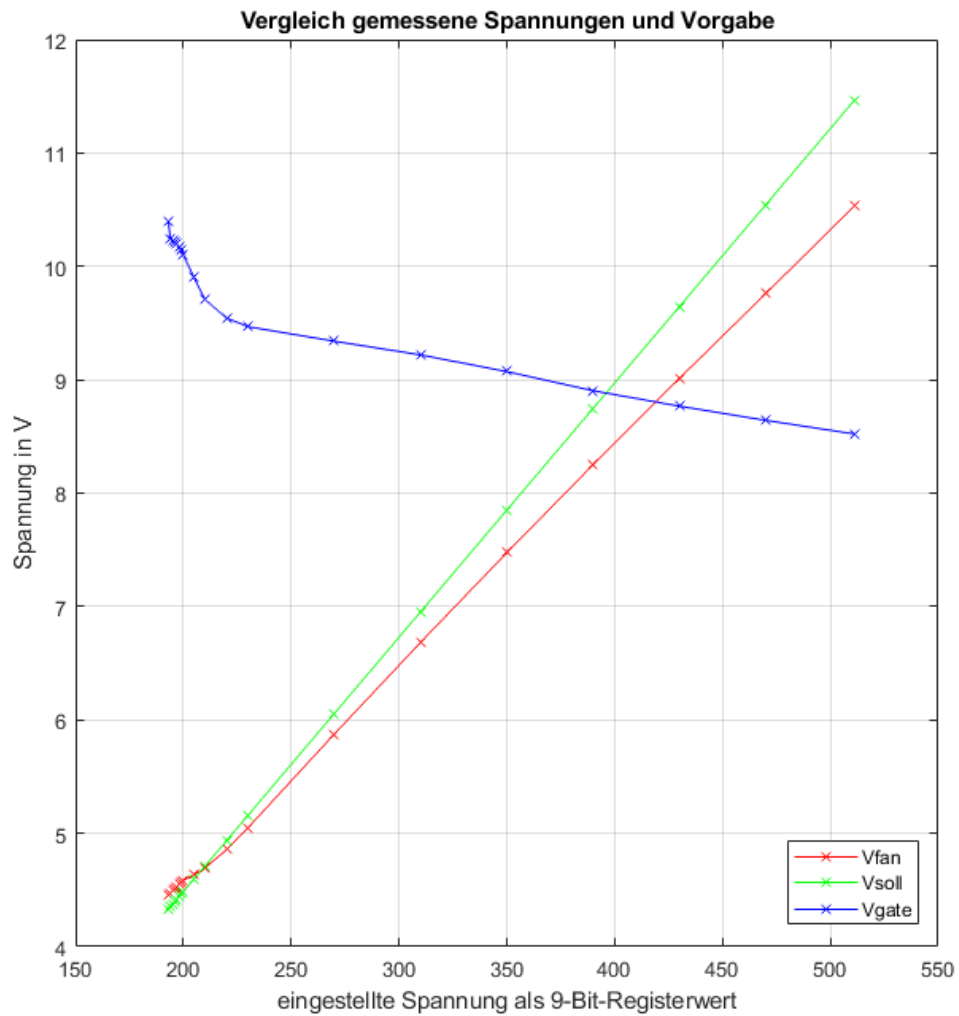


Abbildung 6.11: Spannungen am Lüfter und am Gate des MOSFET in Abhängigkeit von der vorgegebenen Spannung als 9-Bit-Wert und Vergleich der Lüfterspannung mit der nach Datenblatt zu erwartenden

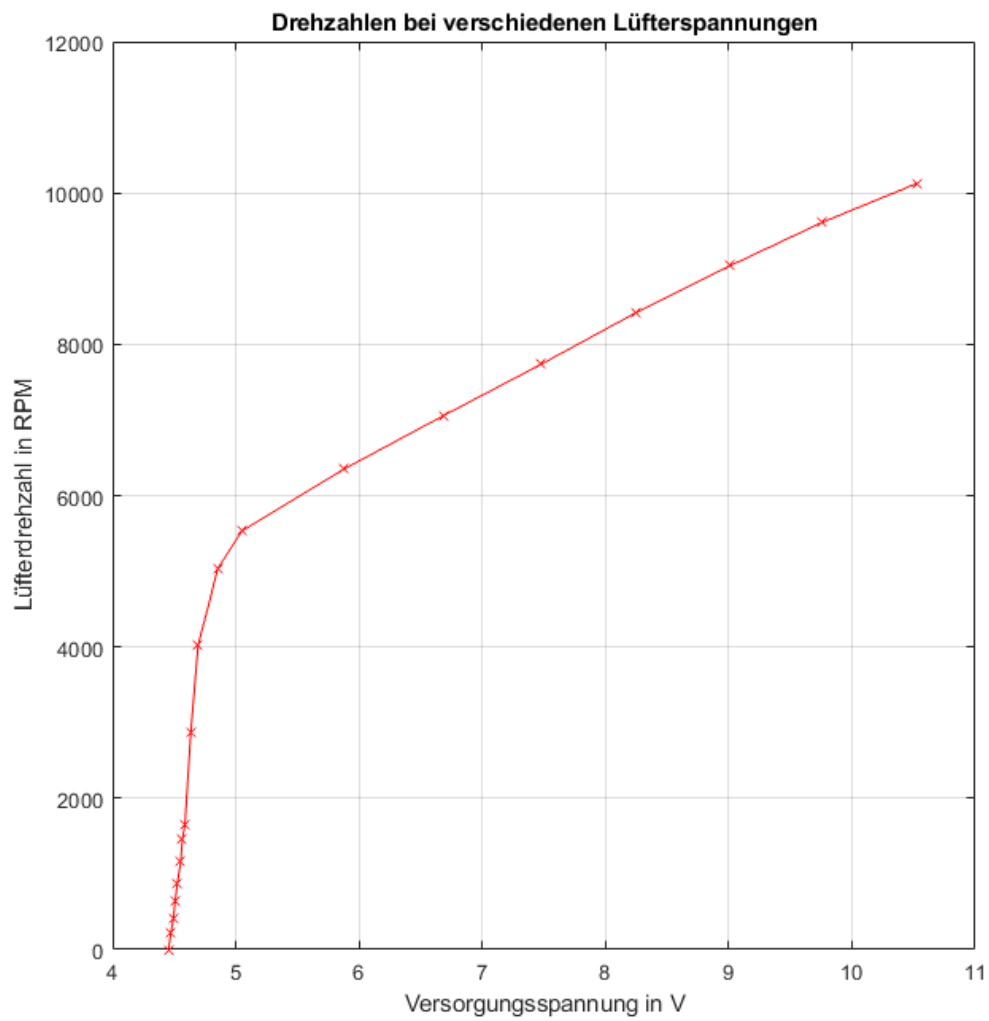


Abbildung 6.12: Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit von der Lüfterspannung in V

In Abbildung 6.12 ist die Drehzahl in Abhängigkeit von der Lüfterspannung anstatt des Registerwerts dargestellt. Es ist kaum ein Unterschied zu Abbildung 6.10 zu erkennen. Die Steigung im unteren Bereich ist leicht anders, aber trotzdem deutlich größer als im oberen Bereich. Dass die Lüfterdrehzahl in diesem Bereich so stark auf kleinste Spannungsänderungen reagiert, kommt also nicht durch die Kennlinie des MOSFET oder eine vom Fan-Speed Controller falsch eingestellte Spannung zustande, sondern ist eine Eigenschaft des verwendeten Lüfters. Dies zeigt auch, warum durch Austauschen des Transistors das Problem der Drehzahlschwankung nicht gelöst werden konnte. Im Datenblatt des Fan-Speed Controllers sind als Möglichkeiten zum Einstellen der Lüfterspannung neben einem MOSFET auch ein Bipolartransistor und Low-Dropout-Spannungsregler angegeben. Beide Optionen wurden testweise ebenfalls ausprobiert, lieferten aber keine Verbesserung der Drehzahlschwankung.

Auch die Verwendung des Evaluationsboards [15] des Fan-Speed Controllers zeigt die gleichen Schwankungen der Drehzahl im unteren Bereich. Mit dem Evaluationsboard kann auch der Betrieb mit einem externen Kristall-Oszillator anstatt des internen Oszillators überprüft werden, aber auch dabei tritt die gleiche Drehzahlschwankung auf. Der Oszillator kann die Regelung in der Hinsicht verbessern, dass die aktuelle Drehzahl aus dem Tacho-Signal genauer bestimmt werden kann. Dadurch wird an den großen Drehzahländerungen bei kleinen Spannungsänderungen nichts geändert und damit, wie zu erwarten, das Problem der Drehzahlschwankung nicht behoben. Es ist also mit diesem Fan-Speed Controller nicht möglich, die vorgegebenen Lüfter im Bereich unter 5000 rpm stabil zu regeln.

Trotzdem ist unklar, warum es mit dem alten System und dem dort verwendeten Fan-Speed Controller MAX6651 möglich ist, die gleichen Lüfter im unteren Drehzahlbereich stabil zu regeln. Die beiden Fan-Speed Controller haben eine unterschiedliche Funktionsweise. Der MAX6651 stellt die Lüfterspannung ein, indem der Masseanschluss des Lüfters mit einem N-Kanal MOSFET auf eine höhere Spannung gesetzt wird. Der MAX6620 hingegen stellt die Spannung ein, indem mit einem P-Kanal MOSFET die Spannung am Versorgungsanschluss reduziert wird. Das ändert aber nichts daran, dass auch beim MAX6651 die im DAC Modus einstellbaren Spannungen im unteren Bereich stark verschiedene Drehzahlen verursachen. Trotzdem ist im RPM Modus keine solche Drehzahlschwankung wie beim MAX6620 erkennbar. Der Unterschied liegt vermutlich in dem Regler, den die Fan-Speed Controller jeweils verwenden, um die Drehzahl zu regeln. Über die verwendeten Regler wird in den Datenblättern allerdings keine Auskunft gegeben, weshalb hier nur festgehalten werden kann, dass der vorgegebene Lüfter im un-

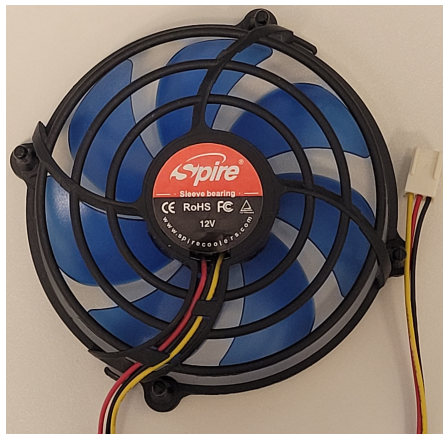


Abbildung 6.13: Alternativer Lüfter

teren Drehzahlbereich mit dem MAX6651 geregelt werden kann, aber nicht mit dem MAX6620.

Zum Vergleich wurde auch ein alternativer Lüfter ausprobiert, welcher in Abbildung 6.13 zu sehen ist. Dieser dient normalerweise als CPU-Lüfter und ist unter anderem wegen seiner Größe nicht für den Einbau in der 19-Zoll-Box geeignet. Trotzdem kann damit der Einfluss der Lüftereigenschaften auf die Regelung gezeigt werden. Für diesen Lüfter wurden ebenfalls verschiedene Spannungen eingestellt und die Drehzahl mit dem Oszilloskop gemessen. In Abbildung 6.14 ist die Kurve der Drehzahl über dem eingestellten Spannungswert dargestellt, gemeinsam mit der Kurve aus Abbildung 6.10. Bei diesem alternativen Lüfter hat die Kurve eine deutlich flachere Steigung. Dafür ist die Drehzahl nur im Bereich von ungefähr 800 rpm bis ungefähr 2400 rpm einstellbar. Höhere Drehzahlen können nicht eingestellt werden, da die Spannung nicht höher eingestellt werden kann. Kleinere Spannungen als der gezeigte Bereich können zwar eingestellt werden, aber der Lüfter erzeugt dann das Tacho-Signal nicht mehr korrekt, sodass weder die Drehzahlregelung möglich wäre noch die Drehzahl mit dem Oszilloskop sinnvoll gemessen werden kann. Entscheidend ist aber, dass dieser Lüfter im Drehzahlbereich von 1000 rpm bis 2000 rpm eine deutlich flachere Steigung der Drehzahlkurve aufweist. In diesem Bereich kann der MAX6620 diesen Lüfter regeln, ohne dass die gleichen starken Drehzahlschwankungen auftreten, als beim vorgegebenen Lüfter.

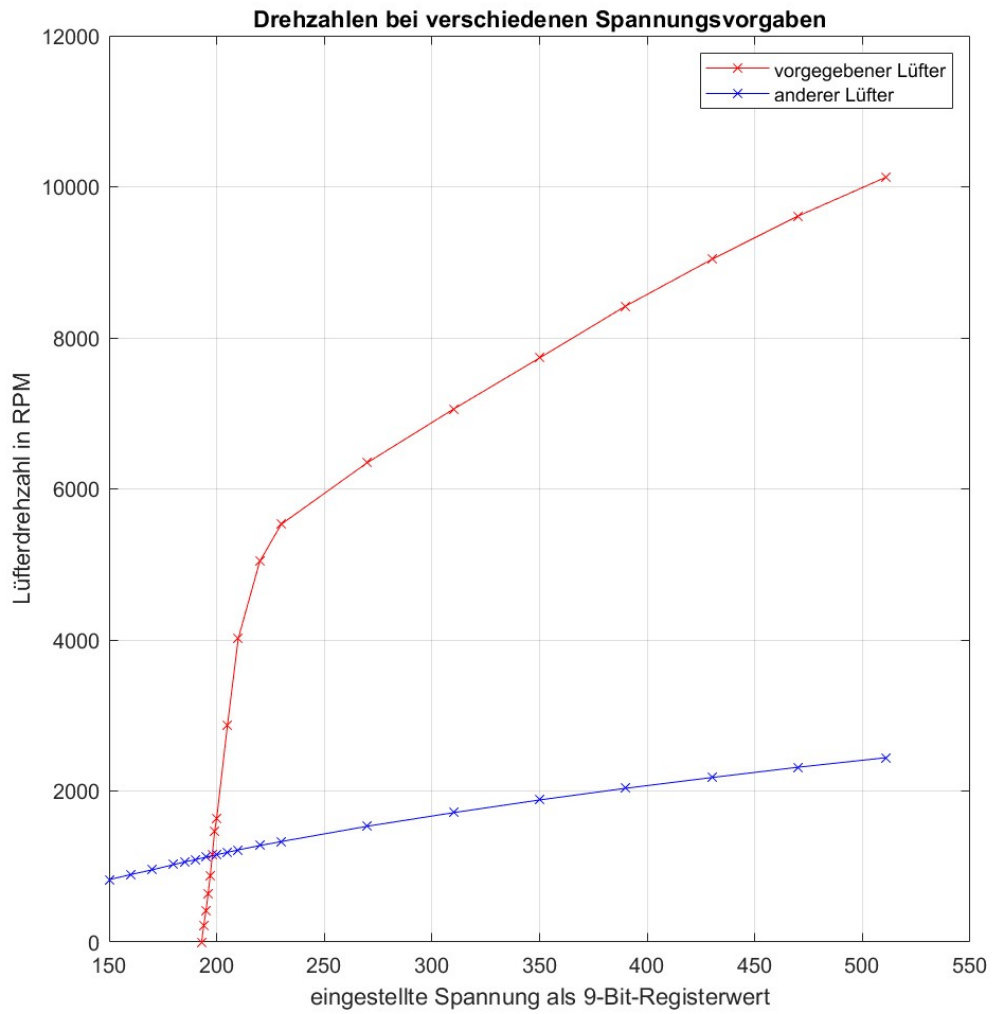


Abbildung 6.14: Vergleich der Lüfterdrehzahlen der beiden unterschiedlichen Lüfter in Abhängigkeit von der vorgegebenen Spannung als 9-Bit-Wert

In Abbildung 6.15 ist eine Oszilloskopmessung zum Vergleich der Drehzahlregelung der beiden Lüfter für 2000 rpm und in Abbildung 6.16 das gleiche für 1000 rpm dargestellt. Die Drehzahl des alternativen Lüfters auszuwerten, war nicht ohne weiteres möglich. Dieser erzeugt auf dem Tacho-Signal nach der negativen Flanke einen kurzen Nachpuls. Dieser verfälscht die Statistik der Frequenzmessung des Oszilloskops stark. Der Fan-Speed Controller wird durch diesen Nachpuls nicht beeinflusst, da er Tachopulse, die schmaler als $25\text{ }\mu\text{s}$ sind, ignoriert. Deshalb wird mit der Math-Funktion des Oszilloskops das Tachosignal auf Kanal C2 mit einem 50 kHz Tiefpassfilter gefiltert und als M1 angezeigt. So wird der Nachpuls weggefiltert, aber der eigentliche Rechteckverlauf des Tacho-Signals mit der gesuchten Frequenz bleibt bestehen. Damit durch diesen Filter keine ungleiche Betrachtung der Tacho-Signale entsteht, wird das Signal vom vorgegebenen Lüfter auf Kanal C3 mit einem identischen Filter gefiltert und als M2 angezeigt. Durch Vergleich der Standardabweichungen bei M1 und M2 wird deutlich, dass der vorgegebene Lüfter eine deutliche Drehzahlschwankung aufweist, während der alternative Lüfter stabil geregelt wird. Dies zeigt, dass tatsächlich die Steigung der Drehzahlkurve entscheidet, ob eine stabile Regelung möglich ist. Es ist also nicht so, dass das System prinzipiell keine niedrigen Drehzahlen regeln kann. Wird ein Lüfter gefunden, der für die 19-Zoll-Boxen geeignet ist und im gewünschten Drehzahlbereich eine ausreichend flache Steigung der Drehzahlkurve aufweist, dann kann das System verwendet werden, um diesen Drehzahlbereich zu regeln. Es wäre besser, wenn das System beliebige Lüfter regeln könnte, aber es konnte gezeigt werden, dass das mit dem MAX6620 nicht möglich ist.



Abbildung 6.15: Vergleich der Drehzahlregelung des vorgegebenen und des alternativen Lüfters bei 2000 rpm: Die Tacho-Signale und Lüfterspannungen werden mit dem Oszilloskop gemessen und ausgewertet; C1: Spannung alternativer Lüfter, C2: Tacho-Signal alternativer Lüfter, C3: Tacho-Signal vorgegebener Lüfter, M1: Tacho-Signal alternativer Lüfter mit 50 kHz Tiefpass, M2: Tacho-Signal vorgegebener Lüfter mit 50 kHz Tiefpass, C4: Spannung vorgegebener Lüfter

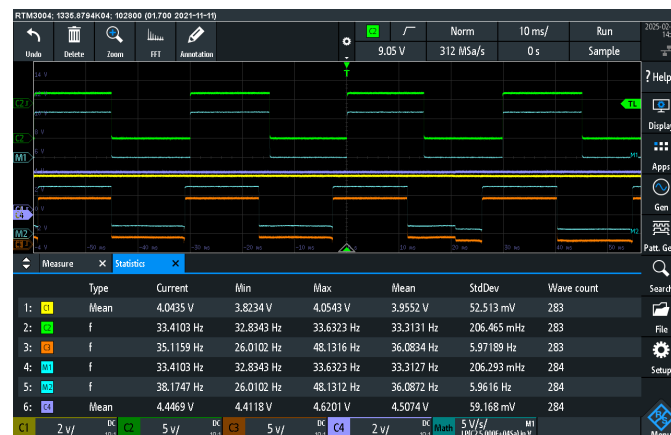


Abbildung 6.16: Vergleich der Drehzahlregelung des vorgegebenen und des alternativen Lüfters bei 1000 rpm: Die Tacho-Signale und Lüfterspannungen werden mit dem Oszilloskop gemessen und ausgewertet; C1: Spannung alternativer Lüfter, C2: Tacho-Signal alternativer Lüfter, C3: Tacho-Signal vorgegebener Lüfter, M1: Tacho-Signal alternativer Lüfter mit 50 kHz Tiefpass, M2: Tacho-Signal vorgegebener Lüfter mit 50 kHz Tiefpass, C4: Spannung vorgegebener Lüfter

6.4 Test der Strommessung

Um die Strommessung zu testen, wird ein Lüfter nicht direkt mit dem Stecker auf der Platine verbunden. Stattdessen werden Tacho- und Masseanschluss mit einzelnen Kabeln zwischen Platine und Lüfter verbunden. Für den Versorgungsanschluss wird zwischen Platine und Lüfter ein Multimeter [26] geschaltet, welches verwendet wird, um den tatsächlichen Lüfterstrom zu messen. Auf der Konsole werden verschiedene Lüfterspannungen eingestellt und jeweils der Stromwert betrachtet, der vom Power Monitor gemessen wird. Dieser ergibt sich, indem der vom Power Monitor per ADC am Shunt bestimmte 16-Bit-Wert vom Mikrocontroller ausgelesen und in einen Strom umgerechnet wird. Dazu wird Formel 6.1 zum Einsatz, wobei V_{SENSE} der vom Power Monitor gelieferte 16-Bit-Wert und I_{SENSE} der gemessene Strom ist. Bei FSC (Full-Scale Current) handelt es sich um den maximal messbaren Strom. Dieser hängt gemäß Formel 6.2 vom Wert des Shunt ab und ist durch den Spannungsbereich des verwendeten ADC begründet. Der im Code verwendete Wert wurde allerdings experimentell auf 2072 mA bestimmt, indem ein fester Strom durch den Shunt gegeben und der Wert für FSC bestimmt wurde, bei dem dieser Strom korrekt gemessen wird.

$$I_{SENSE} = FSC \cdot \frac{V_{SENSE}}{2^{16}} \quad (6.1)$$

$$FSC = \frac{100 \text{ mV}}{R_{SENSE}} \quad (6.2)$$

In Abbildung 6.17 ist für verschiedene vom Multimeter gemessene Ströme der Strom dargestellt, der vom Power Monitor gemessen wurde, im Vergleich zu dem gewünschten Verlauf, bei dem die Werte übereinstimmen. Die Werte des Power Monitors weichen ab, aber der Verlauf ist linear. Das deutet auf einen falsch oder ungenau kalibrierten Wert für FSC hin. Anhand der aufgenommenen Werte wurde der Faktor betrachtet, um den die Werte jeweils abweichen, was dem Faktor entspricht, um den FSC abweicht. So wurde ermittelt, dass der Wert 1970 mA deutlich geringere Abweichungen bringen sollte. Das Makro im Code wurde auf diesen neuen Wert geändert und erneut Messungen des Stroms durchgeführt. Dabei konnten deutlich geringere Abweichungen von 2 mA und weniger beobachtet werden. Es wurden zum Vergleich Werte beim Altsystem aufgenommen und es konnte festgestellt werden, dass die Messung mit dem ungenauen FSC zwar

größere Abweichungen, die Messung mit dem neuen *FSC* Wert aber kleinere Abweichungen als das Altsystem hatte. Die Messungen wurden für einen Kanal durchgeführt. Um zu überprüfen, dass nicht der neue Wert von *FSC* nur bei einem Kanal bessere Werte liefert und die anderen dadurch schlechter abgestimmt sind, wurden auch bei einem zweiten Kanal einige Werte aufgenommen. Dabei traten keine größeren Abweichungen als beim anderen Kanal auf. Es kann also festgehalten werden, dass bei korrekt eingestelltem *FSC* die Strommessung beim neuen System genauer als beim alten ist. Der verwendete Wert gilt für den Prototypen. Bei Umsetzung als produktionsreifes System müsste die Strommessung erneut getestet und der Wert korrekt abgeglichen werden, um die gleiche Genauigkeit zu erreichen.

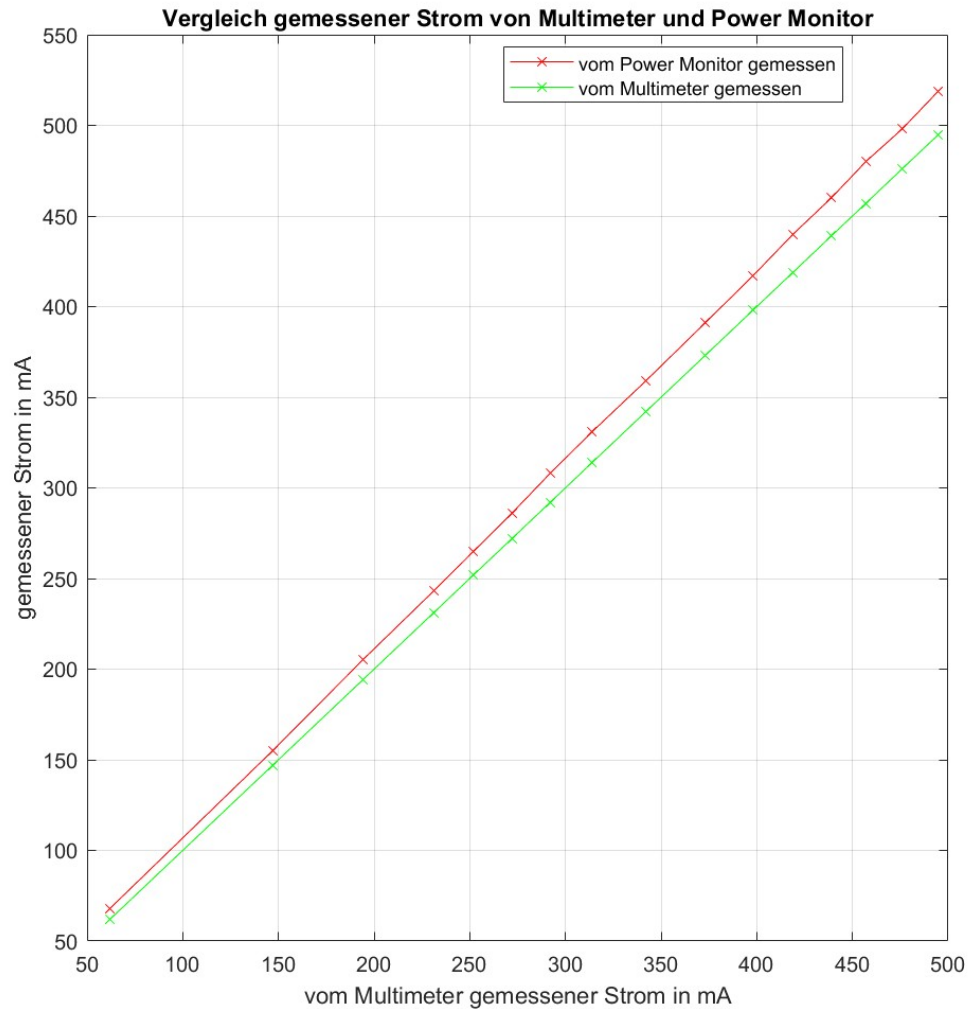


Abbildung 6.17: Vergleich verschiedener Strommesswerte von Power Monitor und Multimeter: Für jeden vom Multimeter gemessenen Wert auf der x-Achse ist auf der y-Achse der vom Power Monitor gemessene und als Vergleich auch erneut der vom Multimeter gemessene Wert eingezeichnet. So ergibt sich in grün der ideale Verlauf, wenn der Power Monitor den gleichen Wert messen würde, wie das Multimeter, und in rot der tatsächliche Verlauf der Messwerte beim Power Monitor.



Abbildung 6.18: Messung der Spannungen auf der Versorgungsseite (C4, blau, oben) und auf der Lüfter Seite (C1, gelb, unten) des Filters mit Oszilloskop und Tastkopf

6.5 Untersuchung des EMV-Filters

Das EMV-Filter soll dafür sorgen, dass die Spannungsversorgung nicht durch die Lüfter gestört wird. Um seine Wirkung zu untersuchen, wird die Spannung auf der Versorgungsseite zwischen Strommessung und Filter und die Spannung auf der Lüfterseite zwischen Filter und MOSFET mit dem Oszilloskop gemessen. In Abbildung 6.18 ist die Messung beider Spannungen mit zwei Tastköpfen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spannung auf der Lüfterseite gestört ist, sich dies aber nicht auf die Versorgungsseite überträgt. Abbildung 6.19 zeigt zusätzlich eine Messung der Spannung auf der Lüfterseite mit einer Power Rail Probe (RT-ZPR20 [21, p 20]). In Abbildung 6.20 ist die gleiche Messung für die Versorgungsseite gezeigt. Besonders die maximale Peak-to-Peak-Spannung ist ein Kriterium für die Qualität der Spannungsversorgung. Dieser Wert ist auf der Lüfterseite deutlich höher, also sorgt das Filter erfolgreich dafür, die Versorgungsspannung vor Störungen zu schützen und stabil und sauber zu halten. Im FFT-Spektrum treten auf der Lüfterseite deutliche Peaks auf (Abbildung 6.21). Der höchste Peak liegt bei circa 250 Hz und die übrigen Peaks sind harmonische davon. Diese Peaks verschieben sich bei Reduzierung der Drehzahl zu niedrigeren Frequenzen. Auf der Versorgungsseite sind diese Peaks nicht oder nur im Ansatz zu sehen (Abbildung 6.22). Dagegen tritt auf der Versorgungsseite ein Peak bei 50 Hz auf, welcher auf der Lüfterseite abgeschwächt ist. Diese 50 Hz Komponente stammt vermutlich aus der Netzspannung und wird durch das Filter für die Lüfterseite abgeschwächt.



Abbildung 6.19: Messung der Spannung auf der Lüfter Seite des Filters mit Oszilloskop und Power Rail Probe



Abbildung 6.20: Messung der Spannung auf der Versorgungsseite des Filters mit Oszilloskop und Power Rail Probe

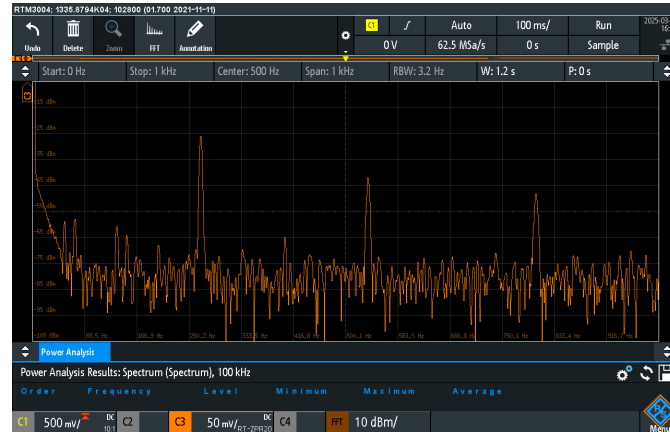


Abbildung 6.21: FFT Spektrum der Spannung auf der Lüfter Seite des Filters mit Oszilloskop und Power Rail Probe gemessen



Abbildung 6.22: FFT Spektrum der Spannung auf der Versorgungsseite des Filters mit Oszilloskop und Power Rail Probe gemessen

6.6 Tabellarische Auflistung der Ergebnisse der Verifikation

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Verifikation zusammengefasst aufgelistet.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Verifikation des neuen Systems zur Lüftersteuerung auf Grundlage der Anforderungen aus Tabelle 3.1

Nr.	Anforderung	Ergebnis
1	individuelle Regelung von drei Lüftern	erfüllt
2	Drehzahlbereich: 500 rpm bis 10 000 rpm	nicht erfüllt (nur 5500 rpm bis 10 000 rpm stabil regelbar)
3	geringere Abweichung der Drehzahl von der Vorgabe als beim bestehenden System	erfüllt (im oberen Drehzahlbereich)
4	geringere Abweichung zwischen den Drehzahlen der Lüfter als beim bestehenden System	erfüllt (im oberen Drehzahlbereich)
5	Strommessung mit IC, welcher per I2C angesprochen wird	erfüllt
6	genauere Strommessung als beim bestehenden System	erfüllt
7	gleiche EMV-Filter wie beim bestehenden System	erfüllt
8	geringere Störung durch die Lüfter auf der Versorgungsseite des Filters als auf der Lüfterseite	erfüllt
9	optional: Verwendung in bestehenden Aufbauten ohne Anpassung des FRED möglich	nicht implementiert

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das bestehende System untersucht, welches momentan bei DESY eingesetzt wird, um die Lüfter zu steuern, welche die Elektronikkomponenten zur Steuerung des Beschleunigerbetriebs kühlen. Dieses System hat den Nachteil, dass von drei Lüftern nur einer drehzahlregelt wird, während die anderen nur mitlaufen. Aus diesem Grund können die Drehzahlen der Lüfter stark voneinander abweichen und einzelne Lüfter sogar stehen bleiben. Aufgrund der besonderen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit beim Beschleunigerbetrieb ist es gewünscht, dass alle Lüfter mit gleicher und möglichst geringer Drehzahl betrieben werden können, um möglichst wenig Störungen (vor allem durch Vibrationen) zu verursachen, ohne die Gefahr, dass ein Lüfter stehen bleibt. Aus diesem Grund wurde ein neues System zur Lüftersteuerung entwickelt, welches jeden Lüfter individuell regelt. Dazu wurde auf Grundlage des Altsystems ein Konzept entwickelt. Zur Drehzahlregelung wird statt des MAX6651 Fan-Speed Controllers der MAX6620 verwendet, welcher die individuelle Regelung mehrerer Kanäle unterstützt. Um die Lüfterströme zu messen und so die Alterung der Lüfter zu überwachen, wird der PAC1954 Power Monitor verwendet, der wie der Fan-Speed Controller direkt über I2C angesprochen wird, sodass der im Altsystem benötigte Mikrocontroller entfallen kann. Stattdessen wird optional ein Mikrocontroller für eine Retrofitlösung verwendet, um die Kommunikation nach außen so zu vermitteln, dass das neue System in bestehenden Aufbauten das Altsystem ohne weitere Anpassungen ersetzen kann. Es wurde ein Schaltplan des neuen Systems im Programm Altium Designer erstellt, der als Grundlage für ein Platinenlayout verwendet werden kann. Dieses wurde im Rahmen der Arbeit nicht mehr erstellt. Die wesentlichen Teile des Schaltplans wurden als Prototyp auf einer Lochrasterplatine umgesetzt. Die Retrofitlösung, bei der der Mikrocontroller auf die I2C-Anfragen reagiert, die für das alte System bestimmt sind und diese zum neuen System vermittelt, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr im Code implementiert. Stattdessen wurde der Mikrocontroller SAMD20J18 auf dem Evaluationsboard programmiert, um auf Konsoleneingaben am PC zu reagieren und die ICs auf dem Prototypen per I2C anzusprechen. Auf diese Weise wurde am Prototyp die Drehzahlregelung und

Strommessung getestet. Dabei fiel auf, dass die Drehzahl bei Vorgaben im Bereich unter 5500rpm stark schwankt. Als Grund für die Schwankung konnte ermittelt werden, dass die Drehzahl in diesem Bereich deutlich empfindlicher auf kleine Änderungen der Spannung reagiert als im oberen Bereich. Da der Fan-Speed Controller die Spannung nur in festen Schritten einstellen kann, liegen die einstellbaren Drehzahlen in diesem Bereich weit auseinander. Beim Versuch, die vorgegebene Drehzahl einzustellen, wird die Spannung immer wieder erhöht und reduziert, was in diesem Bereich zu starken Schwankungen der Drehzahl führt. Neben den Eigenschaften des Lüfters spielt aber auch der verwendete Fan-Speed Controller eine Rolle. Mit dem MAX6651, der beim alten System verwendet wurde, kann dieser Bereich trotzdem stabil geregelt werden. Die Kombination aus den vorgegebenen Lüftern und dem MAX6620 Fan-Speed Controller ist also nicht für den unteren Drehzahlbereich geeignet. Im oberen Drehzahlbereich erreicht das System eine stabile Regelung und geringere Abweichung der Drehzahlen von der Vorgabe und voneinander. Auch die Strommessung und der Schutz der Versorgungsspannung vor Störungen durch Filter konnten erfolgreich verifiziert werden. Da aber gerade der untere Drehzahlbereich entscheidend ist, um möglichst geringe Störungen durch die Lüfter zu erreichen, wird das System mit dieser Kombination von Fan-Speed Controller und Lüfter nicht zum Einsatz kommen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie das Thema dieser Arbeit weitergeführt werden kann. Um das System doch verwenden zu können, muss ein Lüfter gefunden werden, der mit dem MAX6620 im unteren Drehzahlbereich stabil geregelt werden kann. Dazu muss die Kurve der Drehzahl über der Spannung bei diesem Lüfter im unteren Drehzahlbereich eine ausreichend flache Steigung haben. Außerdem muss der Lüfter eine Bauform aufweisen, welche für die Verwendung in den zu kühlenden 19-Zoll-Boxen geeignet ist. In diesem Fall kann das System wie in dieser Arbeit dargestellt umgesetzt werden. Aus dem Schaltplan kann in Altium Designer ein Layout erstellt und damit die Platine produziert werden. Dabei kann die Retrofitlösung implementiert werden, oder der Mikrocontroller wird weggelassen und auf Grundlage des Codes aus dieser Arbeit wird die Firmware des FRED angepasst, um das neue System anzusprechen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den MAX6651 Fan-Speed Controller des alten Systems weiter zu verwenden. Dieser erreicht auch bei hohen Steigungen der Drehzahlkurve eine stabile Regelung, kann aber nur einen Lüfter regeln. Daher könnte ein neues System aufgebaut werden, welches drei dieser Fan-Speed Controller verwendet, einen eigenen für jeden Lüfter. In dem Fall könnten die übrigen Teile des neuen Schaltplans übernommen, aber der MAX6620 durch drei MAX6651 ersetzt werden. Dieser Fan-Speed Controller bietet vier mögliche

I2C-Adressen, sodass alle drei verschiedene Adressen erhalten und am gleichen I2C-Bus verwendet werden können. In dem Fall könnte das System über I2C sehr ähnlich wie das alte angesprochen werden. Bei Einstellungen wie der Änderung der Drehzahl muss der gleiche Wert anstatt nur an einen an alle drei Fan-Speed Controller gesendet werden. Beim Lesen der Drehzahl muss jeder Fan-Speed Controller einzeln angesprochen und ausgelesen werden. Mit diesem Konzept wäre es möglich, alle drei Lüfter auch im unteren Drehzahlbereich individuell und stabil zu regeln. Ob die drei Fan-Speed Controller bei gleicher vorgegebener Drehzahl auch tatsächlich die Lüfter auf die gleiche Drehzahl regeln, oder wie stark die Drehzahlen voneinander abweichen, müsste noch untersucht werden.

Unabhängig davon, wie genau die Lüftersteuerung bei DESY zukünftig umgesetzt wird, konnte durch diese Arbeit gezeigt werden, dass der Drehzahlbereich, in dem eine stabile Regelung möglich ist, von der Kombination aus Lüfter und Fan-Speed Controller abhängt und dass der MAX6620 Fan-Speed Controller nicht geeignet ist, den vorgegebenen Lüfter im unteren Drehzahlbereich zu regeln. Außerdem wurden Erkenntnisse gesammelt, worauf bei der zukünftigen Entwicklung von Systemen zur Drehzahlregelung von Lüftern besonders geachtet werden muss.

Literaturverzeichnis

- [1] ALTIUM: *Altium Designer – PCB-Design-Software*. – URL https://www.altium.com/de/altium-designer?srsltid=AfmBOOpVxVYey0_M4066zPQ0a_IgJtStO3R35mZ2Bn0A4lrK1pGuFPsJ. – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [2] Analog Devices (Veranst.): *MAX6620 - Quad Linear Fan-Speed Controller*. Rev 1. 2013. – Verfügbar unter <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6620.pdf>
- [3] Analog Devices (Veranst.): *MAX6650/MAX6651 - Fan-Speed Regulators and Monitors with SMBus/I2C-Compatible Interface*. Rev 6. 2022. – Verfügbar unter <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6650-MAX6651.pdf>
- [4] Atmel Corporation (Veranst.): *EDBG User Guide*. 2016. – Verfügbar unter <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/atsamd20-xpro> – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [5] Atmel Corporation (Veranst.): *SAM D20 Xplained Pro User Guide*. 2016. – Verfügbar unter <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/atsamd20-xpro> – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [6] DESY: *Beschleuniger*. – URL https://www.desy.de/forschung/beschleuniger/index_ger.html. – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [7] DESY: *Deutschlands größtes Beschleunigerzentrum - Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY*. – URL <https://www.desy.de/>. – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [8] DESY: *European XFEL*. – URL https://www.desy.de/forschung/anlagen__projekte/european_xfel/index_ger.html. – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [9] DESY: *FLASH*. – URL https://www.desy.de/forschung/anlagen__projekte/flash/index_ger.html. – Zugriffsdatum: 14.03.2025

- [10] DESY: *PETRA III*. – URL [https://www.desy.de/forschung/anlagen_
_projekte/petra_iii/index_ger.html](https://www.desy.de/forschung/anlagen/_projekte/petra_iii/index_ger.html). – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [11] HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT: *Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY*. – URL [https://www.helmholtz.de/ueber-uns/helmholtz-zentren/zen
tren-a-z/zentrum/deutsches-elektronen-synchrotron-desy/](https://www.helmholtz.de/ueber-uns/helmholtz-zentren/zentren-a-z/zentrum/deutsches-elektronen-synchrotron-desy/). – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [12] Lantronix (Veranst.): *XPort/XChip User Guide*. Rev N. 2013. – Verfügbar unter [https://www.lantronix.com/wp-content/uploads/pdf/XPort-Use
r-Guide.pdf](https://www.lantronix.com/wp-content/uploads/pdf/XPort-User-Guide.pdf)
- [13] Linear Technology (Veranst.): *LT1963 - 1.5A, Low Noise, Fast Transient Response LDO Regulators*. 2005. – Verfügbar unter [https://www.analog.com/media
/en/technical-documentation/data-sheets/1963fc.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1963fc.pdf) – Zugriffsda-
tum: 14.03.2025
- [14] Linear Technology (Veranst.): *LTC4353 - Dual Low Voltage Ideal Diode Controller*. 2012. – Verfügbar unter [https://www.analog.com/media/en/technica
l-documentation/data-sheets/4353f.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4353f.pdf) – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [15] Maxim Integrated Products (Veranst.): *MAX6620 Evaluation Kit/Evaluation System*. 2008. – Verfügbar unter [https://www.analog.com/media/en/techni
cal-documentation/data-sheets/MAX6620EVCMAXQU-MAX6620EVKIT.
pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6620EVCMAXQU-MAX6620EVKIT.pdf) – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [16] Maxim Integrated Products (Veranst.): *MAX6625/MAX6626-9-Bit/12-Bit Temperature Sensors with I2C-Compatible Serial Interface in a SOT23*. Rev 8. 2019. – Verfügbar unter [https://www.analog.com/media/en/technical-docum
entation/data-sheets/MAX6625-MAX6626.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6625-MAX6626.pdf)
- [17] Microchip Technology (Veranst.): *Advanced Software Framework (ASF) for SAM Devices*. – URL [https://www.microchip.com/en-us/tools-resources
/develop/libraries/advanced-software-framework](https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/libraries/advanced-software-framework). – Zugriffsdatum:
14.03.2025
- [18] Microchip Technology (Veranst.): *PAC1951 Family Data Sheet*. Rev E. 2024. – Verfügbar unter <https://www.microchip.com/en-us/product/pac1954>

- [19] Microchip Technology (Veranst.): *SAM D20 Family Data sheet*. Rev B. 2025. – Verfügbar unter <https://www.microchip.com/en-us/product/atsamd20j18>
- [20] Rohde & Schwarz (Veranst.): *R&S®RTM3000 Oszilloskop*. Rev 08.00. 2023. – Verfügbar unter https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5214_9144_11/RTM3000_bro_de_5214-9144-11_v0800.pdf
- [21] Rohde & Schwarz (Veranst.): *PROBES AND ACCESSORIES - For Rhode & Schwarz oscilloscopes*. Rev 19.00. 2025. – Verfügbar unter https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/oszilloskop-tastkoepfe/power-rail-probes-fuer-oszilloskope_63493-505245.html
- [22] SANYO DENKI (Veranst.): *San Ace 60 L - High Air Flow Long Life Fan*. – Verfügbar unter <https://docs.rs-online.com/88a5/0900766b81297a0a.pdf> – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [23] STMicroelectronics (Veranst.): *L78S - 2 A positive voltage regulator IC*. Rev 8. 2014. – Verfügbar unter <https://www.mouser.de/datasheet/2/389/178s-1849452.pdf>
- [24] Texas Instruments (Veranst.): *TPS255xx Precision Adjustable Current-Limited Power-Distribution Switches datasheet*. Rev F. 2024. – Verfügbar unter <https://www.ti.com/product/de-de/TPS2553>
- [25] Texas Instruments (Veranst.): *Ultra-Small Supply Voltage Supervisors datasheet*. Rev E. 2025. – Verfügbar unter <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps3801.pdf>
- [26] Voltcraft (Veranst.): *Digital-Multimeter - Bedienung*. 2011. – Verfügbar unter <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/cl/-/gl/000124606ML03/manual-124606-voltcraft-vc850-handheld-multimeter-calibrated-to-iso-standards-digital-cat-iii-1000-v-cat-iv-600-v-display-counts.pdf> – Zugriffsdatum: 14.03.2025
- [27] Zetex Semiconductors (Veranst.): *ZXCT1041 - Bidirectional precision high-side current monitor*. Rev 2. 2008. – Verfügbar unter <https://www.mouser.com/datasheet/2/115/ZXCT1041-74444.pdf?srsltid=AfmBOorjPBLiFQBDFY5lGBZDJBvUFnLPykIs1lyarCI7uxlAp6KjrPI>

A Anhang

Tabelle A.1: Drehzahlmesswerte der drei Kanäle des neuen Systems mit dem Oszilloskop bestimmt, alle Angaben in rpm

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
1	1000	1017.873	81.9564	895.992	1191.474
1	1500	1508.337	137.6835	1313.508	1717.470
1	2000	2012.451	52.6896	1829.580	2083.011
1	2500	2471.928	69.2373	2340.807	2594.082
1	3000	3015.480	41.5272	2853.987	3075.840
1	3500	3513.960	50.2623	3455.850	3597.270
1	4000	4007.760	19.6276	3957.240	4044.720
1	4500	4495.140	19.9825	4417.890	4536.510
1	5000	4993.290	20.1041	4956.120	5054.940
1	5500	5494.050	13.2720	5461.560	5526.990
1	6000	6001.710	12.8089	5964.240	6024.240
1	6500	6473.040	9.1735	6447.060	6495.120
1	7000	6981.300	9.5070	6953.370	6995.790
1	7500	7449.000	8.4756	7426.620	7462.620
1	8000	7992.660	9.9073	7973.670	8012.760
1	8500	8477.490	6.9624	8463.810	8502.330
1	9000	8944.620	14.4180	8917.200	8980.500
1	9500	9455.400	7.9567	9438.990	9473.040
1	10000	9942.030	9.5082	9926.130	9961.530
Auf der nächsten Seite fortgesetzt					

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
2	1000	1026.483	128.8002	799.353	1431.636
2	1500	1519.467	82.3533	1393.596	1670.217
2	2000	2086.626	163.0146	1767.444	2434.743
2	2500	2418.564	214.1439	2050.482	3048.990
2	3000	3040.590	178.4475	2749.431	3509.940
2	3500	3519.540	66.6072	3408.060	3632.940
2	4000	3997.920	93.9408	3791.160	4174.800
2	4500	4506.570	28.0071	4429.050	4584.030
2	5000	4988.610	41.0031	4900.140	5065.560
2	5500	5493.300	13.7887	5463.150	5526.420
2	6000	5990.520	9.2073	5961.660	6012.090
2	6500	6466.560	13.2257	6435.390	6499.440
2	7000	6978.390	8.8373	6957.660	6992.070
2	7500	7457.040	11.0634	7430.520	7476.060
2	8000	8003.070	15.0945	7963.230	8049.090
2	8500	8481.900	10.7171	8460.750	8502.030
2	9000	8944.620	9.1238	8923.620	8966.310
2	9500	9463.500	9.0035	9445.140	9490.020
2	10000	9935.490	9.8526	9908.340	9955.380
Auf der nächsten Seite fortgesetzt					

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
3	1000	1017.873	81.9564	741.318	1403.751
3	1500	1624.863	260.8437	1186.800	2026.008
3	2000	2025.105	116.6706	1731.624	2340.681
3	2500	2548.203	165.2001	2260.284	2877.360
3	3000	3022.440	159.4878	2666.391	3431.490
3	3500	3452.040	121.0788	3278.280	3597.270
3	4000	3985.200	70.0707	3830.670	4120.680
3	4500	4491.450	22.9378	4436.250	4540.200
3	5000	4993.020	30.5196	4944.690	5066.100
3	5500	5493.450	13.6375	5454.540	5524.500
3	6000	5997.330	13.2038	5964.360	6026.580
3	6500	6475.290	8.6816	6451.260	6499.770
3	7000	6977.820	10.3221	6948.180	7008.390
3	7500	7450.200	10.7268	7418.220	7473.240
3	8000	7997.970	13.2220	7969.830	8028.450
3	8500	8479.140	13.3556	8447.520	8519.790
3	9000	8927.070	14.4842	8898.060	8951.910
3	9500	9449.340	12.3961	9418.200	9486.120
3	10000	9919.890	8.6711	9901.560	9937.980

Tabelle A.2: Drehzahlmesswerte der drei Kanäle des alten Systems mit dem Oszilloskop bestimmt, alle Angaben in rpm

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
1	500	424.500	2.8194	427.800	445.500
1	550	499.500	5.2620	488.400	511.500
1	600	547.800	3.7200	552.300	560.400
1	650	582.900	3.5400	574.200	591.300
1	700	631.800	2.3364	626.400	637.200
1	750	682.500	2.8194	674.700	689.700
1	800	735.300	5.0190	720.000	747.600
1	850	774.900	4.1910	767.100	788.100
1	900	824.100	3.5550	812.400	834.000
1	950	871.800	3.3690	863.100	882.900
1	1000	910.800	3.1140	905.100	920.700
1	1500	1392.600	3.5190	1380.000	1399.500
1	2000	1867.500	4.7490	1856.400	1881.900
1	2500	2390.700	17.1420	2302.200	2582.400
1	3000	2921.700	35.9400	2840.100	3012.000
1	3500	3375.000	27.6990	3294.000	3462.000
1	4000	4017.000	21.1830	3969.000	4065.000
1	4500	4479.000	20.7000	4425.000	4533.000
1	5000	5040.000	27.5370	4977.000	5121.000
1	5500	5430.000	87.0600	5235.000	5619.000
1	6000	5883.000	56.5800	5745.000	6048.000
1	6500	6228.000	45.6900	6123.000	6330.000
1	7000	6579.000	58.2300	6492.000	6726.000
1	7500	7449.000	59.2500	7389.000	7575.000
1	8000	7971.000	53.4600	7935.000	8109.000
1	8500	7965.000	45.4500	7935.000	8109.000
1	9000	8589.000	60.7800	8400.000	8772.000
1	9500	9318.000	74.9100	9099.000	9555.000
1	10000	10191.000	97.6500	9930.000	10416.000
Auf der nächsten Seite fortgesetzt					

Tabelle A.2 – Fortsetzung

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
2	500	472.500	2.5449	463.500	479.100
2	550	519.600	5.5929	507.000	530.400
2	600	567.000	5.3310	559.500	576.600
2	650	613.800	3.4980	606.000	621.300
2	700	660.600	2.9091	653.700	667.200
2	750	710.700	3.2160	703.500	718.200
2	800	758.700	4.3740	744.600	767.700
2	850	802.500	4.4520	792.300	813.300
2	900	850.800	3.7290	839.400	862.500
2	950	898.800	3.1860	891.600	909.900
2	1000	944.100	3.5850	936.900	955.200
2	1500	1422.000	4.3140	1410.000	1433.700
2	2000	1904.400	5.5440	1889.100	1919.400
2	2500	2389.500	17.2650	2274.600	2567.100
2	3000	2881.800	36.5100	2805.900	2994.000
2	3500	3336.000	408.6000	3234.000	8619.000
2	4000	3870.000	16.7910	3825.000	3915.000
2	4500	4320.000	16.9470	4284.000	4362.000
2	5000	4884.000	20.1150	4839.000	4929.000
2	5500	5346.000	55.9200	5190.000	5538.000
2	6000	5910.000	41.1300	5793.000	5985.000
2	6500	6237.000	49.5300	6123.000	6384.000
2	7000	6606.000	49.4700	6465.000	6696.000
2	7500	7482.000	45.9600	7353.000	7614.000
2	8000	8019.000	42.3000	7854.000	8181.000
2	8500	8025.000	51.2700	7854.000	8196.000
2	9000	8637.000	56.5800	8430.000	8826.000
2	9500	9354.000	53.5500	9153.000	9555.000
2	10000	10200.000	69.1500	9948.000	10491.000
Auf der nächsten Seite fortgesetzt					

Tabelle A.2 – Fortsetzung

Kanal	vorgegeben	Mittelwert	Std.abw.	Min	Max
3	500	459.600	3.4890	451.200	471.000
3	550	509.100	6.4230	496.500	523.200
3	600	565.200	6.1500	552.600	577.800
3	650	598.200	4.7790	586.500	609.600
3	700	646.800	3.3240	637.200	654.300
3	750	696.600	3.9720	688.800	708.900
3	800	747.000	6.1500	729.300	760.500
3	850	789.000	5.0670	778.200	801.900
3	900	844.800	4.3500	832.800	856.500
3	950	893.700	5.3760	880.200	906.600
3	1000	931.200	5.0010	918.600	943.200
3	1500	1437.000	6.2670	1419.000	1452.000
3	2000	1956.300	8.4780	1935.300	1984.200
3	2500	2492.700	18.9780	2379.000	2659.500
3	3000	3042.000	36.6600	2952.600	3138.000
3	3500	3510.000	28.7100	3426.000	3597.000
3	4000	4161.000	23.1270	4104.000	4215.000
3	4500	4638.000	24.3120	4560.000	4695.000
3	5000	5106.000	30.5100	5031.000	5172.000
3	5500	5439.000	83.6700	5244.000	5640.000
3	6000	5868.000	55.0200	5757.000	6000.000
3	6500	6192.000	44.6100	6072.000	6351.000
3	7000	6552.000	54.0600	6438.000	6639.000
3	7500	7407.000	61.2600	7281.000	7575.000
3	8000	7914.000	64.5000	7812.000	7980.000
3	8500	7911.000	66.2100	7812.000	7980.000
3	9000	8544.000	59.2800	8379.000	8724.000
3	9500	9246.000	71.6100	9039.000	9492.000
3	10000	10110.000	87.1800	9867.000	10347.000

MAX6620

Quad Linear Fan-Speed Controller

Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	SCL	I ² C Serial-Clock Input. Can be pulled up to 5.5V regardless of V _{CC} . Open circuit when V _{CC} = 0V.
2	SDA	Open-Drain, I ² C Serial-Data Input/Output. Can be pulled up to 5.5V regardless of V _{CC} . Open circuit when V _{CC} = 0V.
3	WD_START	Startup Watchdog Set Input. This input is sampled when power is first applied and sets the initial I ² C watchdog behavior. When connected to GND, the watchdog function is disabled. When connected to V _{CC} , the MAX6620 monitors SDA. If 10s elapse without a valid I ² C transaction, the fan drive goes to 100%.
4, 10, 11, 18, 25	GND	Ground
5	ADDR	I ² C Address Set Input. This input is sampled when power is first applied and sets the I ² C slave address. When connected to GND, the slave address will be 0x50. When unconnected, the slave address will be 0x52. When connected to V _{CC} , the slave address will be 0x54.
6	DAC_START	Startup Fan Drive DAC Set Input. This input is sampled when power is first applied and sets the power-up value for the fan drive voltage. When connected to GND, the fan drive voltage will be 0%. When unconnected, the fan drive voltage will be 75%. When connected to V _{CC} , the fan drive voltage will be 100%.
7	SPINUP_START	Startup Spin-Up Set Input. This input is sampled when power is first applied and sets the initial spin-up behavior. When connected to GND, spin-up is disabled. When connected to V _{CC} at power-up, the fan is driven with a full-scale drive voltage until two tachometer pulses have been detected, or 1s has elapsed. When unconnected, the fan is driven with a full-scale drive voltage until two tachometer pulses have been detected, or 0.5s has elapsed. Spin-up behavior may be modified by writing appropriate settings to the MAX6620's registers.
8, 9	X1, X2	Crystal Oscillator Inputs. Connections for a standard 32.768kHz quartz crystal. The internal oscillator circuitry is designed for operation with a crystal having a specified load capacitance (C _L) of 12pF. Connect an external 32.768kHz oscillator across X1 and X2 for operation with the external oscillator. If no crystal or external oscillator is connected, the MAX6620 will use its internal oscillator.
12, 17, 19, 24	DACOUT4–DACOUT1	Fan Drive DAC Outputs. Connect to the gate of a p-channel MOSFET or base of a PNP bipolar transistor.
13, 16, 20, 23	DACFB4–DACFB1	DAC Feedback Inputs. Connect a 0.1μF capacitor between these pins and GND. Connect to the supply pin of the fan and to the drain of a p-channel MOSFET or collector of a PNP bipolar transistor.
14, 15, 21, 22	TACH4–TACH1	Fan Tachometer Logic Inputs. These inputs accept input voltages up to V _{FAN} .
26	FAN	Fan Power-Supply Voltage Input. Connect to the fan power supply (V _{FAN}). Bypass with a 0.1μF capacitor to GND.
27	VCC	Power-Supply Input. 3.3V nominal. Bypass V _{CC} to GND with a 0.1μF capacitor.
28	$\overline{\text{FAN_FAIL}}$	Active-Low, Open-Drain Fan Failure Output. Active only when fault is present; open-circuit when V _{CC} = 0V. This pin can be pulled up to 5.5V regardless of V _{CC} .
—	EP	Exposed Paddle. Internally connected to GND. Connect to a large ground plane to maximize thermal performance. Not intended as an electrical connection point.

Abbildung A.1: Beschreibung der Pins des MAX6620 Fan-Speed Controllers aus dem Datenblatt [2, p 7]

B Inhalt der CD

Der vollständige Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden. Die folgenden Verzeichnisse und Dateien sind dort enthalten:

- `BachelorarbeitRobinErasmus`: pdf-Dokument der Arbeit
- `Schaltplandokumente`: der Schaltplan des bestehenden Systems zur Lüftersteuerung (nicht selbst erstellt), der Schaltplan des neuen Systems (selbst erstellt, auf Grundlage des alten Schaltplans, einige Teile sind direkt übernommen)
- `Quellcodes`: Alle verwendeten C-Quellcode und -Header Dateien (Es ist jeweils als Kommentar gekennzeichnet, welche Teile selbst erstellt wurden)
- `Messwerttabellen`: Excel-Tabellen mit den aufgenommenen Messwerten

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original