

Bibliographische Beschreibung:

Toth, Enrico:

Konzeption und Inbetriebnahme eines MSR-Systems für einen Komponentenprüfstand einer Flüssigkeitskühlung. Schwerpunkte sind Temperaturmessungen, welche über LabView ausgewertet werden sollen.

Aufgabenpunkte:

- Konzeption und Inbetriebnahme eines rechnerunterstützten Messsystems
- Auswahl und Inbetriebnahme von Messverstärker und Messwertumformer
- Entwicklung einer Prüfoberfläche
- Entwicklung eines automatisierten Prüfstandversuches

2009. – 86 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik, Studiengang Mechatronik, Diplomarbeit 2009

Kurzfassung:

Ziel der Diplomarbeit ist es, einen Prüfstand für Komponenten einer PC-Flüssigkeitskühlung zu entwickeln und in Betrieb zu nehmen.

Der Prüfstand besteht dabei aus zwei Modulen. Das Modul für die Funktionalität des Kreislaufes beinhaltet den variablen Hydraulikschaltplan zum Verschalten von Einzelkomponenten einer PC-Flüssigkeitskühlung.

Das andere Modul ist das Mess- und Steuersystem und dient dabei dazu, zahlreiche physikalische Werte aufzunehmen und umzuformen, sowie Funktionen des Prüfstandes zu steuern.

Die Auswertung der Daten erfolgt mittels LabView. Die Bedienoberfläche der Software ermöglicht einen schnellen Überblick der Messdaten und erlaubt dem Benutzer eine aktive Steuerung des Systems.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Zielsetzung	6
1.3	Gliederung	6
2	Konzeption des Steuer-Mess-Regelprüfstandes	7
2.1	Konzeption des Prüfstandes.....	7
2.2	Ansprüche und Funktionalität der Hardware	8
2.3	Ansprüche an die Software des Messsystems	8
3	Realisierung der Hard- und Softwarefunktionen	9
3.1	Zusammensetzung des Messsystems mit allen Karten.....	10
3.1.1	Die asynchrone Datenübertragung zwischen ADA-IO und Interface-Platine	12
3.2	PC-Interface und Stromversorgung	13
3.2.1	Aufbau	13
3.2.2	Die Stromversorgung der IFP-Platine.....	13
3.2.3	Das Interface zwischen PC und Hardware	14
3.3	Geschwindigkeit der RS232-Schnittstelle und Geschwindigkeitsbremsen	14
4	Realisierung der Temperaturmessung	15
4.1	Referenzspannungsquelle.....	15
4.2	Die Pt-100 Messstrecke (Variante1).....	16
4.3	Die Pt-100 Messstrecke (Variante2).....	20
4.4	Die Pt-100-Messstrecke (Variante3).....	22
4.4.1	Zusammenfassung und Erkenntnis	24
4.5	Verarbeiten der Messdaten aus der PT-100-Messschaltung.....	25
4.5.1	ADA-IO-Karte	25
4.5.2	Analog/Digital-Konverter (16Bit)	25
4.5.3	Aufbau der Schaltung	26
4.5.4	Funktionsweise der Schaltung.....	27
5	Umsetzung der Lüftersteuerung	28
5.1	Digital/Analog-Konverter (12Bit)	28
5.1.1	Aufbau der Schaltung.....	28

5.2	Aufbau der Lüfter- Treiberschaltung	29
6	Software	32
6.1	Vorstellung der Programmierumgebung von LabView	32
6.2	Aufbau der Benutzeroberfläche	33
6.3	Der Programmablaufplan	34
6.4	Vorstellen der einzelnen Sequenz-Strukturen und deren SubVI	35
6.4.1	Abfrage ADC (10Bit) Lüfterspannungen	35
6.4.2	Abfrage ADC (16Bit) Pt-100_Messkarte	37
6.4.3	Vorgabe der Lüfterspannungen	38
6.4.4	Übertragung der Lüfterspannungen ins Messsystem	39
6.4.5	Mittelwertbildung der Lüfterspannungen	43
6.4.6	Ausgabe der Lüfterspannungen	50
6.4.7	Berechnung der Widerstandswerte und Temperaturen für die PT-100- Elemente	53
6.4.8	Die Implementierung in LabView	66
6.4.9	Anzeige der PT-100-Temperaturwerte	69
6.4.10	Ermittlung der Differenztemperaturen	70
7	Aufbau des Prüfstandes	72
7.1	Das Messsystem	73
7.2	Die Radiator/Lüftereinheit	75
7.3	Der Flüssigkeitskreislauf	76
7.4	Hydraulikschaltplan des Prüfstandes	77
7.5	Der Aufbau des Hydraulikschaltplanes	77
7.6	Test einer externen CPU	80
7.7	Test der HTF- Fusion oder mehrerer externer Geräte	81
7.8	Test einer externen Pumpe	82
7.9	Test eines externen Radiators	83
8	Ausblick	85
9	Anhang:	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Hardware des Messsystems im Überblick	10
Abbildung 2: Schaltplan Referenzspannungsquelle	15
Abbildung 3: Spannungsgesteuerte Stromquelle	17
Abbildung 4: Variante 1 Differenzverstärker	18
Abbildung 5: Variante 2: Differenzverstärker und Butterworth-Tiefpass 2. Ordnung	20
Abbildung 6: Layout Variante 2	21
Abbildung 7: Schaltplan Butterworth-Tiefpass 2. Ordnung	21
Abbildung 8: Messstrecke Variante 3: Instrumentenverstärker	22
Abbildung 9: Layout Pt100-Messschaltung (Variante3)	24
Abbildung 10: Schaltplan für Lüfter-Treiberstufe	29
Abbildung 11: Ansteuerung der Lüfter-Treiber-Stufe durch den DAC	30
Abbildung 12: Layout FAN-Leistungsverstärker	31
Abbildung 13: Bedienoberfläche	33
Abbildung 14: Abfrage ADC (10Bit) der Lüfterspannungen	35
Abbildung 15: Abfrage ADC (16Bit) Pt100 Messkarte	37
Abbildung 16: Ausschnitt Bedienpanel (Lüftersteuerung/Überwachung)	38
Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen	38
Abbildung 18: Übermittlung der Fan-Spannungen ins Messsystem	39
Abbildung 19: SubVI FAN-Control	41
Abbildung 20: Berechnung der ADC(10Bit) FAN-Spannungen	44
Abbildung 21: Extrahieren der Eingangswerte in Einzelelemente	44
Abbildung 22: SubVI Ringpuffer	45
Abbildung 23: Berechnung Mittelwert	47
Abbildung 24: Verteiler der IO8-32_Karte	48
Abbildung 25: Der angepasste Verteiler	49
Abbildung 26: Ausschnitt Bedienpanel	50
Abbildung 27: Ausgabe Lüfterspannungen	51
Abbildung 28: Blockdiagramm SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen)	51
Abbildung 29: Frontpanel SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen)	52
Abbildung 30: Berechnung der Widerstands und Temperaturwerte der Pt100-	

Messglieder.....	53
Abbildung 31: AD-Eingang der AD-Wandlerkarte	57
Abbildung 33: Vereinfachung des Netzwerkes	57
Abbildung 34: Einfügen der Ersatzspannungsquelle und des Ersatzwiderstandes	58
Abbildung 35: Spannungsteiler	58
Abbildung 36: Berechnung der Widerstandswerte und dazugehörigen Temperaturen	66
Abbildung 37: Frontpanel zur MathScript-Berechnung	67
Abbildung 38: Anzeige der Temperaturwerte.....	69
Abbildung 39: Korrektur der Temperaturwerte.....	69
Abbildung 40: Rahmen 8 der Sequenzstruktur, Ermittlung der Differenztemperaturen	70
Abbildung 41: Ausschnitt Frontpanel, Anzeige der Differenztemperaturen.....	71
Abbildung 42: Dynamische Achseinteilung	71
Abbildung 43: Aufbau Prüfstand	72
Abbildung 44: Prüfstand.....	72
Abbildung 45: Messsystem Frontansicht	73
Abbildung 46: Wärmetauscher mit den 3 Lüftereinheiten	75
Abbildung 47: Flüssigkeitskreislauf des Prüfstandes	76
Abbildung 48: Hydraulikschaltplan Prüfstand.....	77
Abbildung 49: Flussschaltplan bei Anschluss einer externen Wärmequelle (CPU, RAM, GPU).....	80
Abbildung 50: CPU-Kühler für Pentium 4.....	80
Abbildung 51: GPU-Kühler mit RAM und Spannungswandlerkühler.....	80
Abbildung 52: Flussschaltplan HTF-Fusion	81
Abbildung 53: Flussschaltplan bei Anschluss einer externen Wasserpumpe	82
Abbildung 54: Flussschaltplan bei Anschluss eines externen Wärmetauschers....	83
Abbildung 55: Single-Radiator	83
Abbildung 56: Dual-Radiator	83
Abbildung 57: Tripple-Radiator	83

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Firma Watercool ist ein innovatives und mehrfach ausgezeichnetes Unternehmen, das auf dem Gebiet der PC-Wasserkühlungen Maßstäbe setzt. Endprodukte sind Kühler für CPU, Grafikkarten, RAM, Festplatten Northbridge, Southbridge, Spannungswandler sowie externe und interne Radiatoren. Die Komponenten werden dabei so gefertigt, dass sie in schon bestehende Kreisläufe integriert werden können.

Durch die schnellen Produktzyklen seitens Hardware-Industrie ist Watercool bestrebt, seine Produktpalette fortwährend zu erweitern. Auf Grund der großen Vielfalt vorhandener Hardware ist das Ziel der Firma Watercool, für die am häufigsten gekauften Hardwarekomponenten, eine Umrüstung auf Wasserkühlung zu ermöglichen.

Schnelle Produktzyklen setzten effiziente Arbeitsabläufe voraus, um Produkte schnellst möglich am Markt anbieten zu können. Der Test der Komponenten am Prüfstand stellt einen bedeutenden Anteil in der Entwicklungszeit dar.

Diesen Prüf.- und Testablauf, mit einem flexiblen einsetzbaren Prüfstand in Verbindung mit Auswertung über einen Computer, zu verbessern, ist die Motivation der Diplomarbeit.

1.2 Zielsetzung

Am Beginn der Diplomarbeit steht die Konzeption aller benötigten Komponenten für den Prüfstand. An zweiter Stelle steht die Entwicklung von Messwertumformern- und Treiberplatinen im Vordergrund. Der Zusammenbau mit anschließenden Tests und Modifizierungen stellt die Fertigstellung der Hardware für das Messsystem dar.

Im Anschluss erfolgt die Programmierung der Bedienoberfläche mit Hilfe von LabView.

Am Ende der Diplomarbeit sind Überlegungen bezüglich technischer und programmdidaktischer Verbesserungen bzw. Erweiterungen anzustellen.

1.3 Gliederung

Diese Diplomarbeit gliedert sich wie folgt:

Im nächsten Kapitel wird auf den Entwurf sowie die Rahmenbedingungen des Prüfstandes eingegangen. Der Schwerpunkt liegt in der Erfassung der benötigten Komponenten der Prüfstandtechnik und der Ansprüche an die zu programmierende Software.

Kapitel 4 befasst sich mit der Auswahl, Beschreibung und Verwendung der Hardware-Module im Messsystem.

Die zwei folgenden Kapitel beschreiben die Entwicklungsschritte der speziell für diesen Prüfstand selber entwickelten Baugruppen. Dabei steht als erstes die Entwicklung einer Messwertumformerschaltung für einen Pt100-Messwiderstand und als zweites die Gestaltung einer Treiberschaltung für die Lüftereinheit im Vordergrund.

Kapitel 7 ist dem programmtechnischen Aspekt, der Beschreibung und Dokumentation der LabView- Bedienfunktionalität gewidmet.

Das folgende Kapitel beschreibt den fertigen Prüfstand und seine Verwendung.

Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Diplomarbeit bewertet und Verbesserungsvorschläge bzw. Ideen für mögliche Folgeprojekte diskutiert.

2 Konzeption des Steuer-Mess-Regelprüfstandes

2.1 Konzeption des Prüfstandes

Der Prüfstand soll für den Test verschiedener Komponenten, die für das Entwickeln erfolgreicher Wasserkühlungen notwendig sind, ausgelegt werden.

Im Vordergrund stehen dabei Tests externer Komponenten wie z.B. CPU-Kühler, externer Wasserpumpen sowie Radiatoren.

Die wichtigsten Parameter für das Optimieren einer Wasserkühlung sind die Temperaturen der Flüssigkeit in das Messsystem und aus dem Prüfstand heraus. Die Differenztemperatur des Kühlmediums Wasser zur Luft ist der wichtigste Indikator für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Maßgeblich sind dabei die Leistungsfähigkeiten des Wärmetauschers sowie die des Kühlers.

Der Wärmetauscher entzieht dem Wasser ein Teil der Energie und kühlt es dabei ab. Je größer dabei die Abkühlung des Wassers ist, desto geringer ist die Differenztemperatur Wasser-Luft.

Die Differenztemperatur Kühlelement-Verbraucher, die den Abtransport der Verlustwärme vom Verbraucher wieder spiegelt, sollte ebenfalls so gering wie möglich ausfallen.

Ein im Prüfstand integriertes Heizelement simuliert eine Wärmequelle und ermöglicht somit das Testen eines externen Radiators.

Überblick der zu integrierenden Komponenten für den Prüfstand:

- Wärmetauscher
- Heizelement
- Pumpe
- 3 Lüftereinheiten, die separat angesteuert werden können
- Aufbau der Komponenten als Reihenschaltung
- Anschluss externer Komponenten wie z.B. Wärmequelle, Radiator, Wasserpumpe einzeln oder in Kombination
- Variabler interner Flüssigkeitskreislauf

2.2 Ansprüche und Funktionalität der Hardware

Die Entwicklungshardware soll robust und flexibel ausgelegt werden. Der Prüfstand soll einen Wärmetauscher in Verbindung mit mindestens 3 Lüftereinheiten, die getrennt von einander betrieben werden sollen, enthalten. Die Drehzahl der Lüfter soll variabel gestaltet werden, d.h., dass die Drehzahl im laufenden Betrieb verändert werden soll. Die 3 Lüftereinheiten sollen einzeln oder im Verbund zu bzw. abgeschaltet werden können.

Eine Wasserpumpe sowie die Möglichkeit, anhand von Ventilen im Flüssigkeitskreislauf die Flussrichtung der Flüssigkeit zu verändern, ergänzt das System.

2.3 Ansprüche an die Software des Messsystems

Die Software soll übersichtlich und funktional gestaltet werden. Die Bedienoberfläche beinhaltet die Temperaturen des Wassers, die an zwei markanten Punkten im Flüssigkeitskreislauf entnommen werden. Die Wassertemperatur, die in den Prüfstand hinein fließt sowie die Temperatur des Wassers, die den Prüfstand verlässt sollen erfasst und angezeigt werden. Des Weiteren ist die Umgebungstemperatur zu erfassen und in der Bedienoberfläche anzuzeigen.

Eine Steuerung der Lüfterspannungen ist vom Programm aus vorzunehmen. Die Änderung der Spannung beeinflusst dabei die Lüfterdrehzahl und damit die Wärmeabfuhr aus dem Radiator. Vorgaben der Lüfterspannungen sollen in einer Anzeige dargestellt werden.

Die Funktionalität der Software im Überblick:

- Anzeige Kühlwasser in den Prüfstand
- Anzeige Kühlwasser aus dem Prüfstand
- Anzeige Umgebungsluft
- Anzeige Differenztemperaturen (Wasser – Luft)
- Steuerung der Lüfterdrehzahl im laufenden Betrieb
- Anzeige der realen Lüfterspannungen

3 Realisierung der Hard- und Softwarefunktionen

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung, aller im Messsystem verwendeter Hardware-Module.

Die Hardware gliedert sich in Komponenten aus dem c't-Lab-Projekt der c't-Zeitschrift sowie selber entwickelter und angebundener Platinen.

Die verwendeten Komponenten aus dem c't-Lab-Projekt sind:

- ADA-IO-Karte
- AD16-8/DA12-8-Platine
- IO8-32-Portanschluss
- IFP-Karte
- DCG-Platine

Die selber entwickelten Zusatzplatinen sind:

- Pt100-Messwertumformerschaltung
- Lüftertreiber-Schaltung
- teilweise Modifikation der c't-LAB-Platinen und Umbau

Der Schwerpunkt lag hier nicht auf einem kompletten Neuentwurf aller elektronischer Schaltungen inklusive der Anbindung dieser Komponenten an den PC, sondern die Verwendung derer als Basis für die Messhardware. Der zeitliche Rahmen der Diplomarbeit hätte für die Entwicklung eines solchen Systems nicht ausgereicht.

Ergänzende Module zur Anpassung der geforderten Aufgabenstellung an das System waren unumgänglich.

3.1 Zusammensetzung des Messsystems mit allen Karten

Der Prüfstand ist ein kompaktes Modul zur Erfassung und Verarbeitung präziser Temperaturen und Spannungen. Daten können mittels USB, X-Port oder - wie bei uns verwendet - mit RS232 an den PC geschickt und im Anschluss mit LabView ausgewertet werden. Der Benutzer bekommt einen Überblick aller Temperaturen, anliegender Spannungen und Drehzahlen der Lüfter. Aktionen des Anwenders werden von LabView an den Prüfstand geschickt.

Der Prüfstand besteht aus einer A/D, D/A- und Port-Motherboard-Platine (ADA-IO) in Verbindung mit einem Bedienpanel (PM8) und der I/O-8-32 Steckkarte, dem Interface-Power Supply-Modul (IFP), einem Analog/Digital-Wandler (AD-16-8), einem Digital/Analog-Wandler, einem Direct Current-Generator (DCG), der Pt100-Messwertumformer-Platine und einer Lüfter-Treiber-Endstufe. Alle Komponenten finden Platz in einem kompaktem 19" Rack-Gehäuse.

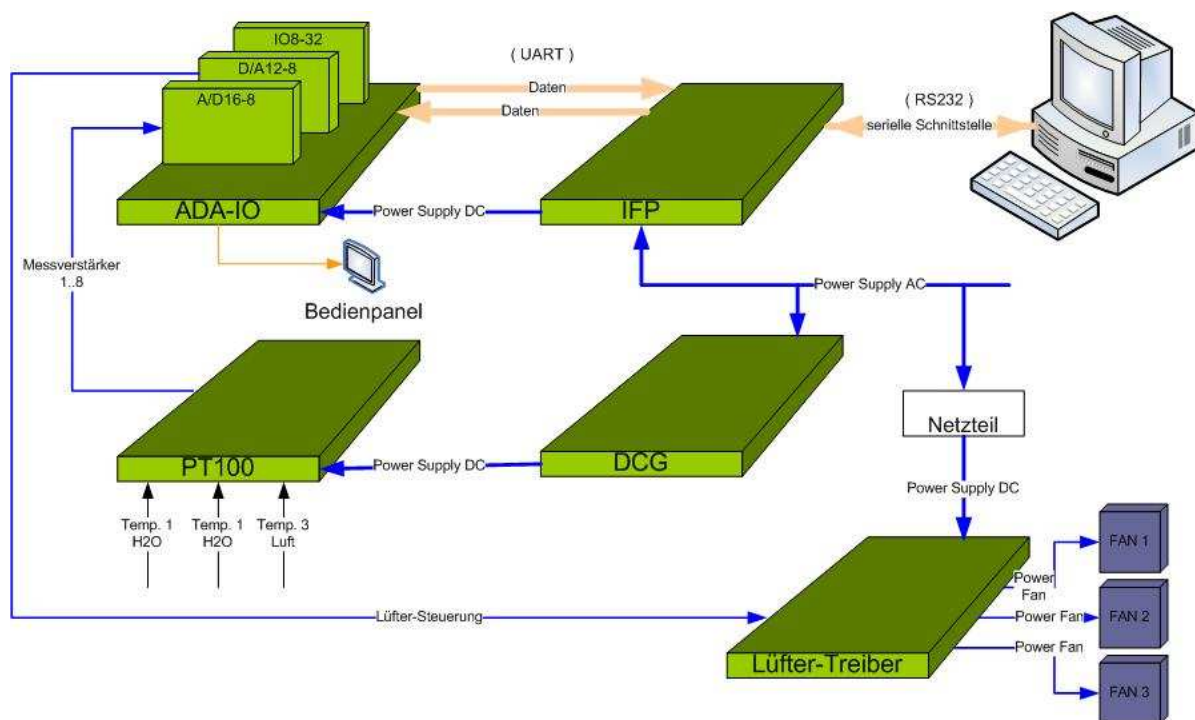


Abbildung 1: Die Hardware des Messsystems im Überblick

Die ADA-IO Karte dient als frei konfigurierbares Messwert-, Erfassungs- und Ausgabemodul und besitzt fünf parallel geschaltete Slots in Form von 64-poligen VG-Federleisten, einen integrierten AT-Mega32-Mikrocontroller sowie ein Bussytem. Die dafür vorgesehenen Steckkarten (AD-16-8, DA-12-8, I/O8-32) funktionieren nur in Verbindung mit der ADA-IO-Karte als Träger und Treiber.

Zum Auslesen der Ports des AT-Mega32 wird die I/O-Karte benötigt. Sie enthält neben den rein digitalen Portbausteinen den Vorteiler und RC-Filter für den internen A/D-Wandler des AT-Mega32.

Die I/O-Steckkarte dient primär als optionale Erweiterung für eine spätere Tastenanbindung (z.B. Start, Stopp). Die I/O-Karte beinhaltet den Spannungsteiler für die AD-Eingänge des Controllers der ADA-IO-Platine. Dieser Spannungsteiler wurde derart erweitert, dass knapp 15V, statt vorher 10V verarbeitet werden können. Diese Modifikation wurde notwendig für das Auslesen der realen Lüfterspannungen, welche bis zu 14,7V betragen können.

Das Bedienpanel ist eine Zusatzplatine, auf der sich zwei Taster, ein Inkremental-Drehgeber und ein zweizeiliges LC-Display befinden. Damit lässt sich das ADA-IO-Modul nahezu vollständig bedienen. Es werden die internen, A/D sowie D/A-Kanäle und zugehörigen Werte angezeigt.

Zwei weitere Steckkarten sind die A/D und D/A-Karten. Die AD16-8-Karte (16Bit Auflösung, 8 Kanäle) enthält einen hochwertigen Wandlerchip, der bei viereinhalb Dezimalstellen Genauigkeit aller 10ms eine Messung zurückliefert. Der Spannungsbereich liegt bei -10V bis 10V. Genutzt wird die Genauigkeit bei der Wandlung des Spannungssignals der Pt100-Messwertumformerschaltung.

Die Pt100-Messwertumformerschaltungen liefern uns Temperaturen von festgesetzten Messstellen der Wasserkühlung. Die AD16-8-Karte wird durch die ADA-IO-Platine mit Spannung versorgt und diese übernimmt auch den Datentransfer über das IFP-Modul zum Rechner oder direkt zum Bedienpanel. Die DA12-8-Karte wird ebenfalls auf die Federleiste der ADA-IO-Einheit gesteckt und mit Spannung versorgt. Ihre technischen Daten im Abriss sind; 12Bit D/A-Konverter, 8 Ausgangskanäle und ein nutzbarer Spannungsbereich von -10V bis 10V. Genutzt wird die D/A-Karte zum Ansteuern der Lüftereinheit.

Die Motherboard-Platine wird von der IFP-Karte mit Strom versorgt. Ein weiteres Feature der IFP-Karte ist, dass sie die nötigen Schnittstellen zum PC beinhaltet. Die Daten können via USB, XPORT oder - wie von uns verwendet - mittels serieller Schnittstelle (RS-232) von der ADA-IO-Karte aus über die IFP-Platine an den Rechner geschickt und empfangen werden. Ausgewertet werden die Daten Hardwareseitig vom AT-Mega32 und Softwareseitig mit LabView (PC).

Die DCG-Platine ist ein programmierbares und galvanisch getrenntes Netzteil, das zwei Ausgangsspannungsbereiche, vier Strombereiche bereitstellt und durch den internen A/D-Wandler den jeweiligen Ist-Wert zurückliefert. Wir beschränken uns derzeit auf eine einfache Spannungs- und Stromversorgung der Pt100-Schaltung, womit die Ressourcen zum Großteil ungenutzt bleiben.

3.1.1 Die asynchrone Datenübertragung zwischen ADA-IO und Interface-Platine

Der Austausch der Daten zwischen den Daten der ADA-IO-Platine (A/D, D/A, IO8-32) und dem PC erfolgt über die interne serielle Schnittstelle des Controllers. Die Schnittstelle ist als einfache Stromschnittstelle bzw. 20mA-Schnittstelle implementiert worden. Der Vorteil dieser Schnittstelle ist ihre leichte Anwendung, einfache Realisierung der Potentialtrennung sowie ihre großen Reichweiten von bis zu 1000m.

In der Regel besteht eine Stromschnittstelle aus einer geschlossenen Sende- und Empfangsschleife. In die Schleife wird auf der aktiven Seite ein Konstantstrom von 20mA eingeprägt. Um einen Low-Pegel zu übertragen, wird der Stromfluss unterbrochen, bei der Übertragung eines High-Pegels bleibt die Schleife geschlossen.

Die Daten vom AT-Mega32 TxD (Tranceive Data) gelangen über einen Treiberwiderstand (R1, ADA-IO) an PIN 7 und PIN 8 des Wannensteckers PL3 (ADA-IO). An Pin 9 und Pin 10 liegt die Versorgungsspannung von 5V an. Ein 10-poliges Flachbandkabel verbindet die ADA-IO-Platine mit der IFP-Platine. Eingangsseitig des IFP-Moduls wird an PIN 7, 8, des Wannensteckers (PL2, IFP) das Signal von der

ADA-IO-Platine empfangen.

Das RxD-Signal (Receive Data) passiert den Optokoppler und gelangt im Anschluss an den MAX232, der aus den 4V-5V eingangsseitig die benötigten Spannungsbereiche -3...-15V (High) ausgangsseitig sowie eingangsseitig 0V-0,8V (Low) die Ausgangsspannungsbereiche +3...+15V mittels Spannungspumpe generiert.

3.2 PC-Interface und Stromversorgung

3.2.1 Aufbau

Die IFP -Platine stellt zwei wesentliche Funktionen zur Verfügung. Zum einen übernimmt sie den Datentransfer mittels USB, X-Port oder - wie bei uns verwendet - über RS232 und zum anderen stellt sie die Versorgungsspannungen für die ADA-IO, AD16-8, DA12-8, IO38-Karten bereit.

3.2.2 Die Stromversorgung der IFP-Platine

Die Stromversorgung für die eigene Elektronik und ein Zusatzmodul, - hier die ADA-IO-Karte - wird aus zwei Print-Transformatoren realisiert. Analogelemente und Digitalelemente werden dabei aus je einem Transformator versorgt. Für die Analoghardware (OPV, Ref.-Spannungsquelle etc.) stehen dabei +- 15V zur Verfügung und für die digitalen Elemente (μ C, LCD etc.) +5V.

Die Stabilisierung der Spannung erfolgt über Rund-Gleichrichter mit einem parallel geschalteten Siebkondensator gegen die Restwelligkeit und einem 100n Kondensator für die Rauschunterdrückung. Im Anschluss werden die Spannungen durch Spannungsregler auf die -15V, +15V sowie +5 begrenzt und stehen jetzt zur Verfügung.

Bei der Masseführung wurde auf eine strikte Trennung der Analog- und Digitalmasse geachtet. Beide Massenleitungen sind nur an einem Punkt miteinander verbunden um zu verhindern, dass der Betriebsstrom des Controllers bzw. des Displays über eine analoge Masseleitung fließt und dort eventuell Ergebnisse verfälscht.

3.2.3 Das Interface zwischen PC und Hardware

Das Interface der IFP-Platine untergliedert sich in drei Varianten. Es besteht die Möglichkeit, die Daten mittels Ethernet, USB oder seriell zu verschicken und zu empfangen. Per Jumper ist eine der drei Varianten frei zu schalten bzw. ist softwaremäßig (PC-seitig) dafür zu sorgen, dass nur eine Schnittstelle angesprochen wird, da es sonst auf der Datenleitung zu Kollisionen kommt. Bei unserem Projekt wurde sich für die einfachste und preiswerteste Variante, - die RS232-Schnittstelle - entschieden. Mit Hilfe des MAX232-Treibers ist es problemlos möglich, den bipolaren RS232-Pegel auf TTL-Niveau anzuheben bzw. abzusenken.

3.3 Geschwindigkeit der RS232-Schnittstelle und Geschwindigkeitsbremsen

Die Default-Übertragungsrate der ADA-IO-Platine zur IFP-Platine beträgt 38400Bit/s. Die Dateneingänge eines jeden Moduls besitzen, um eine vollständige Potentialtrennung zu erreichen, einen schnellen Optokoppler, der gewisse Latenzen mit sich bringt. So braucht ein Messergebnis ca. 4ms von Modul zu Modul; hinzu kommt die eigentliche Messzeit des 16Bit A/D-Wandlers gemultiplext auf 8-Kanäle von 10ms.

4 Realisierung der Temperaturmessung

Im folgenden Kapitel erfolgt die Beschreibung der Entwicklung der Pt100-Messwertumformerschaltung. Sie dient der Aufnahme von Temperaturen an markanten Punkten im Flüssigkeitskreislauf der Wasserkühlung sowie der Ermittlung der Umgebungsluft als Referenzwert.

Die Pt100-Messwerterfassungskarte wird an die vorhandene AD16-8 Karte angebunden. Die Daten gelangen über die ADA-IO und IFP-Karte an den Rechner und sollen hier von LabView ausgewertet und verarbeitet werden.

4.1 Referenzspannungsquelle

Die Temperaturmessung erfolgt über eine Zweileiter-Pt100-Messschaltung. Der Messschaltung geht eine Konstantspannungsquelle voraus, realisiert mit einer Referenzspannungsquelle von Linear Technology, dem LT1019.

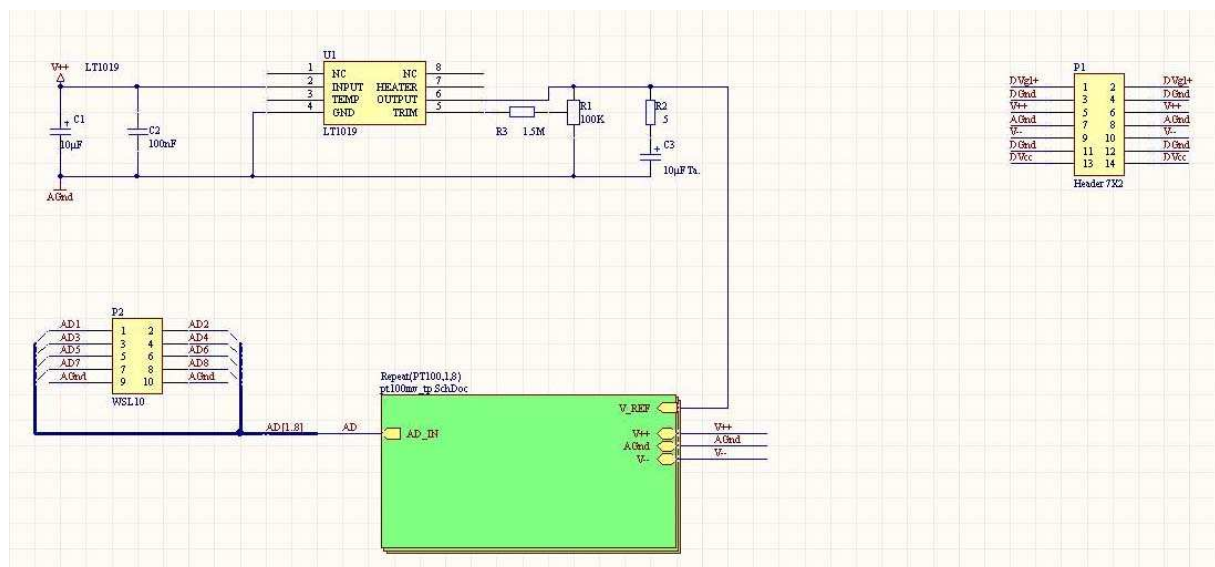


Abbildung 2: Schaltplan Referenzspannungsquelle

Die Referenzspannungsquelle liefert eine Spannung von 2,56V; die Beschaltung erfolgte nach Datenblatt. Der LT1019 steht für alle 8 möglichen Pt100-Messstrecken zur Verfügung. Während der Entwicklung und Dimensionierung der Pt100-Messstrecke entstanden drei verschiedene Varianten, von denen die letzte Messschaltung implementiert wurde.

4.2 Die Pt-100 Messstrecke (Variante1)

Allen Varianten geht eine Konstantstromquelle voraus (siehe Abbildung 2: Schaltplan Referenzspannungsquelle), die zur Widerstandsbestimmung mit einem Pt-100-Messfühler benötigt wird. Der Grundgedanke bei dieser Messvariante ist, dass der Strom durch den Messwiderstand konstant gehalten wird und sich somit nur der Spannungsabfall über dem Widerstand ändert. Die Spannungsänderung ist proportional zur Widerstandsänderung. Verändert sich der Widerstand auf Grund einer Temperaturveränderung, so ändert sich der Spannungsabfall über dem Widerstand. Der Spannungsabfall lässt sich an Hand der Werte des Datenblattes des Pt100-Messfühlers wie folgt berechnen:

Widerstand	$R_0 = 100\Omega$ bei 0°C	Konstantstrom: $I = 1\text{mA}$
	$R_{100} = 138,5\Omega$ bei 100°C	

Mit der Formel:

Formel 1

$$U = R * I$$

ergeben sich folgende Spannungen

Formel 2

$$0^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad U_0 = R_0 * I = 100\Omega * 0,001\text{A} = 0,1\text{V}$$

Formel 3

$$100^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad U_{100} = R_{100} * I = 138,5\Omega * 0,001\text{A} = 0,1385\text{V}$$

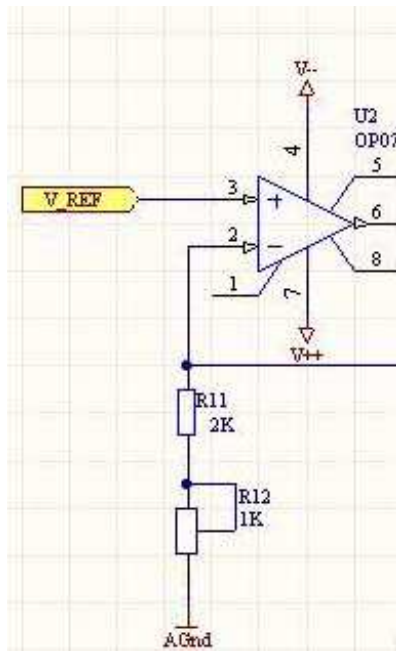


Abbildung 3: Spannungsgesteuerte Stromquelle

Formel 4

$$I = \frac{V_{REF}}{R_{11} + R_{12}}$$

$$I = \frac{2,56V}{2000\Omega + 560\Omega}$$

$$I = 1mA$$

Der Ausgangsstrom wurde so gering wie möglich gehalten, um die Eigenerwärmung des Pt100-Messwiderstandes so gering wie möglich zu halten. Dennoch bleibt der Nachteil, dass der temperaturabhängige Anteil des Zuleitungswiderstandes (Messleitung des Widerstandes) mit in die Rechnung eingeht. Bei einer Vierleitungsvariante würde dieser Zuleitungswiderstandsanteil nahezu eliminiert werden.

Durch Verwendung von Pt100 Temperaturfühlern mit vergossenen und wasserdichten Anschlussleitern wurde hier die Zweileitertechnik verwendet.

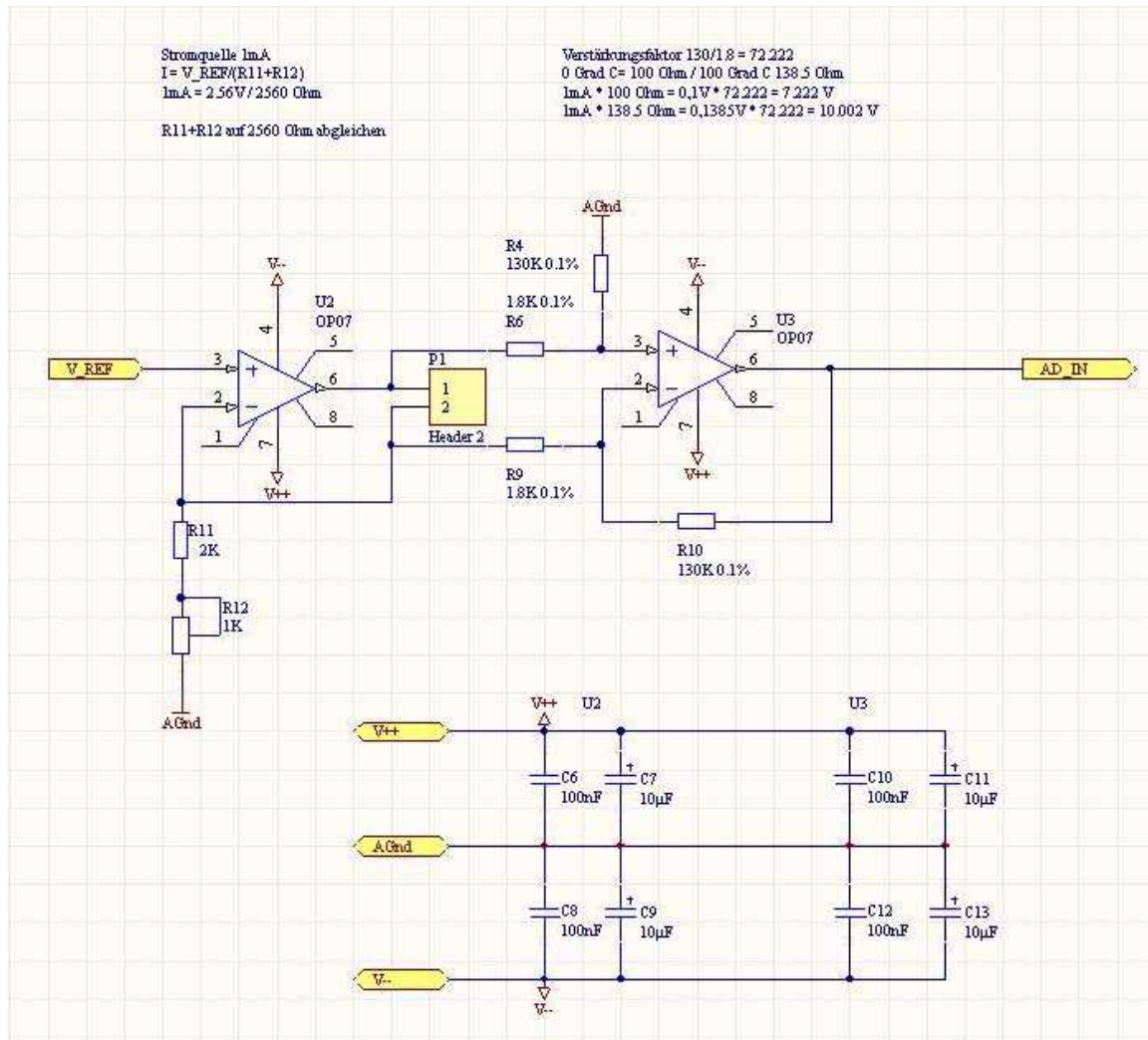


Abbildung 4: Variante 1 Differenzverstärker

Der Messwiderstand wird bei dieser Beschaltung in Reihe im Rückführzweig des Spannungs-Strom-Wandlers geschaltet. Die Spannungsänderung zwischen Eingang und Ausgang des Messwiderstandes wird mit einer anschließenden diskret aufgebauten Differenzverstärkerschaltung gemessen. Auf Grund der Symmetrie der Widerstände $R10 = R4$ sowie $R9 = R6$ erfolgt die Berechnung des Verstärkungsfaktors über die vereinfachte Formel:

Formel 5

$$v_u = \frac{U_a}{U_e} \quad | \quad U_e = (U_{e+} - U_{e-})$$

Formel 6

$$U_a = \frac{R10}{R9} * (U_{e+} - U_{e-})$$

Formel 7

$$v_u = \frac{U_a}{(U_{e+} - U_{e-})} = \frac{R_{10}}{R_9} = \frac{130k\Omega}{1,8k\Omega} = 72,222$$

v_u = Verstärkungsfaktor

U_{e+} = Spannung am Eingang des PT100-Gliedes

U_{e-} = Spannung am Ausgang des PT100-Gliedes

Der Verstärkungsfaktor wurde so angepasst, dass zum einen die Spannungsdifferenz zwischen 0°C und 100°C so groß wie möglich und zum anderen der maximale Analogspannungseingang des ADC nicht überschritten wird.

Im unteren Teil der Schaltung befindet sich die Beschaltung der positiven und negativen Spannungseingänge der beiden Operationsverstärker. Die parallel geschalteten Kondensatoren sind gegen die Restwelligkeit sowie für die Spannungsstabilisierung der Eingangsspannungen vorgesehen. Beide Schaltplaneinzelzeichnungen sind logisch miteinander verbunden, jedoch der Übersichtlichkeit halber separat gezeichnet.

Nach den theoretischen Vorbetrachtungen erfolgte das Belichten, Entwickeln sowie die Bestückung der Platine mit anschließenden Tests. Die Tests ergaben einen nicht konstanten Verstärkungsfaktor und damit ein Schwanken sowie eine Welligkeit in der Ausgangsspannung. Um dieses Rauschen zu unterdrücken, erfolgte eine Änderung des Schaltplanes dahingehend, dass ein Tiefpass 2'ter Ordnung zwischen Ausgang Differenzverstärker und Eingang ADC geschaltet wurde.

4.3 Die Pt-100 Messstrecke (Variante2)

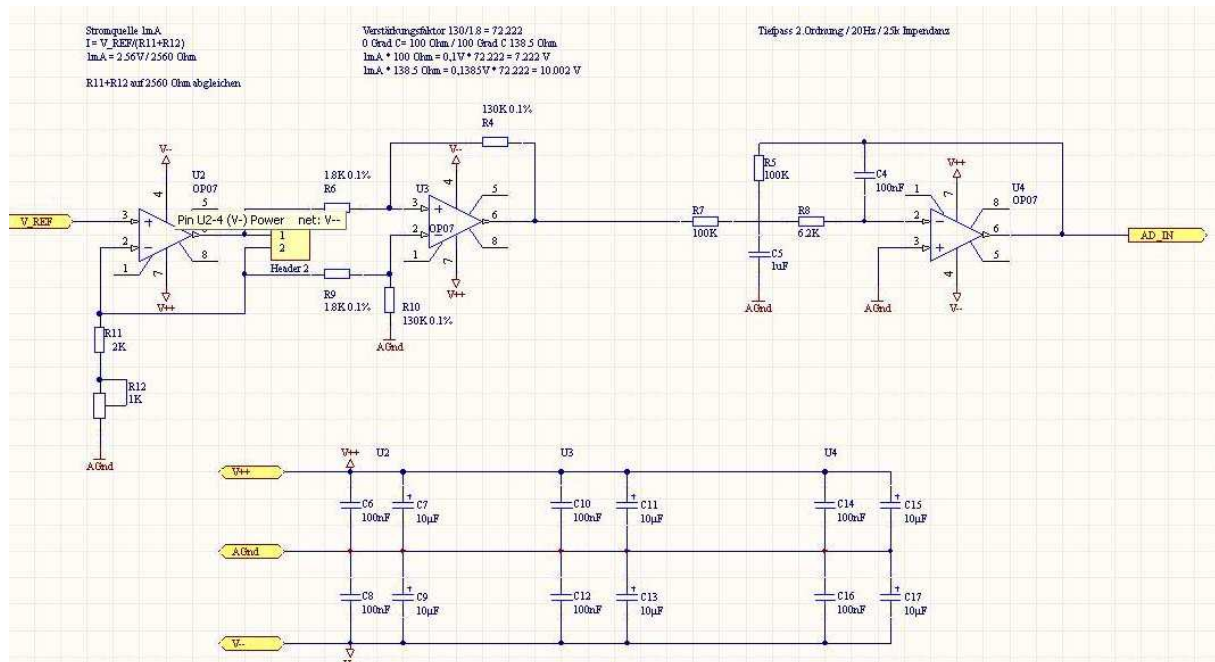


Abbildung 5: Variante 2: Differenzverstärker und Butterworth-Tiefpass 2. Ordnung

Die Ursache für die instabile Spannung am Ausgang der vorherigen Schaltung mündet in der Vermutung, dass sich Störfrequenzen in die Schaltung einkoppeln. Die Grenzfrequenz wurde bei 20Hz festgesetzt, um auch Frequenzen, die durch Leuchtstoffröhrenlampen (50Hz) übertragen werden, auszugrenzen. Entschieden wurde sich für ein Tiefpassfilter 2'ter Ordnung von Butterworth. Er besitzt eine geringe Restwelligkeit im Sperrbereich. Dieser Sperrbereich wurde so bemessen, dass alle Frequenzen größer 20Hz gefiltert werden. Aus Effektivitätsgründen wurde die Filterdimensionierung mit Hilfe des Programms „AktivFilter 2.4“ realisiert.



Bild 5.3.1 Dimensionierung des Butterworth-Filters

Zur Filterdimensionierung wurde ein idealer OPV angenommen und die Widerstände ohne Abstimmwiderstand für den OPV gewählt, da hier kein exaktes Frequenzband eingehalten werden musste, sondern lediglich die Störeinkopplungen der vermuteten Leuchtmittel eliminiert werden sollten. Die Störfrequenzen wurden bei 50Hz (Netzfrequenz) vermutet. Um sie sicher herauszufiltern wurde der Filter auf eine Grenzfrequenz von 20Hz dimensioniert.

Nach den theoretischen Vorbetrachtungen erfolgte wieder das Belichten, Entwickeln, Bohren sowie das Bestücken der Platine mit anschließenden Tests. Die Tests ergaben jedoch keine wesentliche Verbesserung des Ausgangssignals.

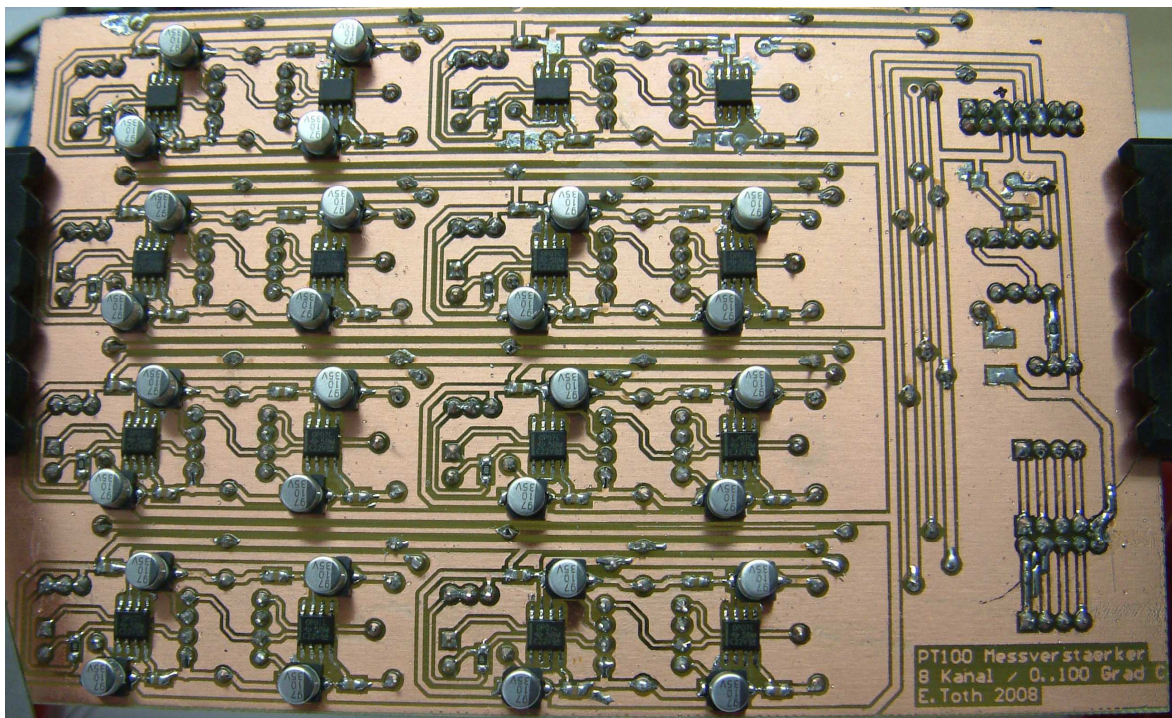


Abbildung 6: Layout Variante 2

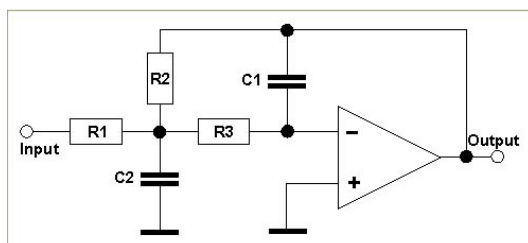


Abbildung 7: Schaltplan Butterworth-Tiefpass 2. Ordnung

Um dieses Problem zu beseitigen, wurden die bisherigen zwei Varianten verworfen und der Schaltplan noch einmal komplett überarbeitet.

4.4 Die Pt-100-Messstrecke (Variante3)

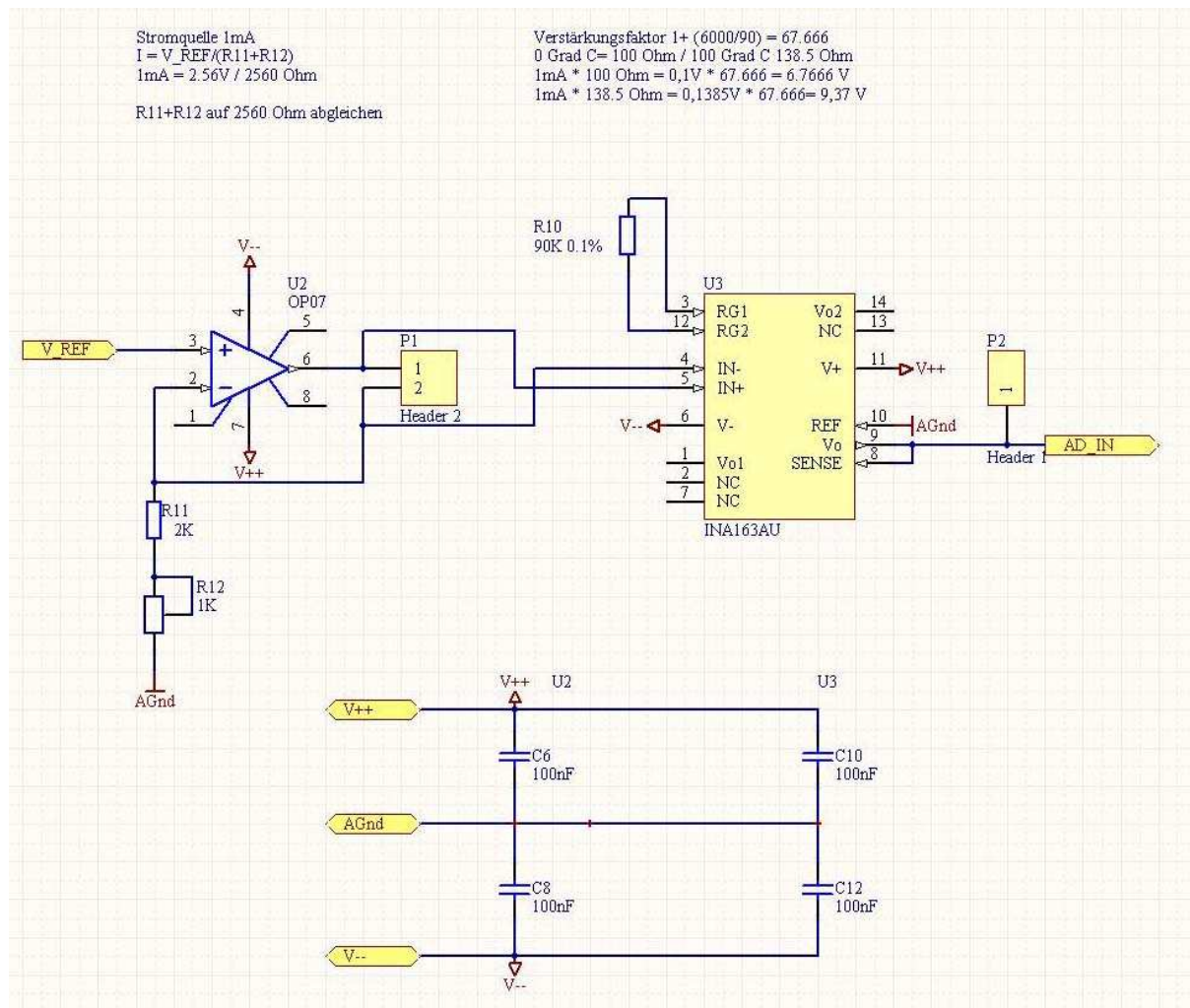


Abbildung 8: Messstrecke Variante 3: Instrumentenverstärker

Das Problem der Störfrequenzen im Bereich der vermuteten Netzspannung wird nun durch Austauschen eines Instrumentenverstärkers gegen den diskret aufgebauten Differenzverstärker sowie des Filters gelöst.

Der Instrumentenverstärker bietet eine deutlich höhere Gleichtaktunterdrückung gegenüber eingekoppelten Störspannungen. Durch seine hohe Eingangsimpedanz eignet er sich außerdem hervorragend zur Verstärkung von Sensoren, die mit einem sehr geringen Strom gemessen werden, wie unser Pt100-Messwiderstand.

Der von uns verwendete Instrumentenverstärker (INA163AU) ist ein integrierter Baustein mit präzise abgeglichenen Widerständen im OPV-Gehäuse.

Daraus resultiert eine höhere Genauigkeit der Verstärkung. Die integrierte Schaltung enthält drei Operationsverstärker, deren Temperatur- und Eingangsspannungsfehler sich weitgehend kompensieren.

Auf Grund der Änderung der Schaltung wurde auch der Verstärkungsfaktor verändert. Er ergibt sich aus der aus dem Datenblatt ersichtlichen Formel:

$$G = 1 + \frac{6000\Omega}{R_G} \quad \text{mit : } R_G = 90\Omega$$

ergibt sich:

$$v = 1 + \frac{6000\Omega}{90\Omega} = 67,6666$$

Die Tests im Anschluss zeigten ein Ausgangssignal frei von dem bisherigen Rauschen und somit für die folgende Analog/Digital-Wandlung brauchbar.

Der in den zwei vorausgegangenen Varianten (Variante 1, 2) benutzte Differenzverstärker zum Ermitteln der Differenzspannung am PT100-Messwiderstand bot eine geringe Gleichtaktunterdrückung. Eine gleich große Spannungsänderung an den Eingängen führt, bei ungenügender Gleichtaktunterdrückung, zu einer geringfügigen Änderung des Ausgangssignals.

Der Instrumentenverstärker brachte eine wesentlich höhere Gleichtaktunterdrückung. Er ist somit gegen Offsetspannungen oder Offsetspannungsfuktuationen unempfindlicher.

4.4.1 Zusammenfassung und Erkenntnis

Es waren drei Schaltungsvarianten nötig, um die Differenz der Spannung des PT100-Messgliedes zwischen Eingang und Ausgang zu bestimmen, zu verstärken und derart frei von überlagerten Störspannungen bereitzustellen, dass eine Weiterverarbeitung durch den A/D-Wandler möglich war.

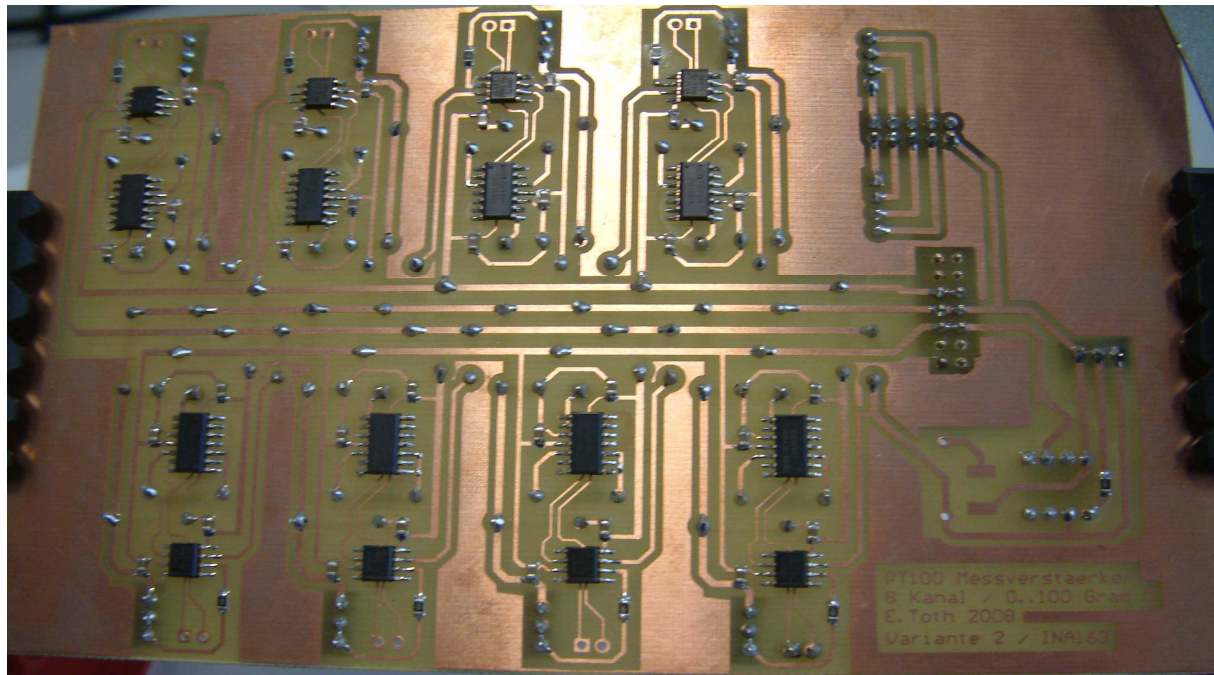


Abbildung 9: Layout Pt100-Messschaltung (Variante3)

4.5 Verarbeiten der Messdaten aus der PT-100-Messschaltung

4.5.1 ADA-IO-Karte

Die ADA-IO-Karte ist hardwareseitig das Herzstück. Auf ihr befindet sich ein mit 16MHz getakteter AVR ATmega32 Controller. Er stellt einen I2C-Bus für Sensoren sowie ein serielles Bussystem zur Kommunikation mit weiteren Modulen, der IFP-Platine und einem an die IFP-Platine via serieller Schnittstelle angeschlossenen Rechner zur Verfügung. Er bietet 64 I/O-Leitungen, acht A/D-Kanäle mit wahlweise 8Bit oder 10Bit sowie acht D/A-Kanäle, an.

Der ATmega32 Controller kann mittels Starterkit 500 oder direkt mit einem Insystem-Programmieradapter (ISP) geflasht werden. Die ADA-IO-Platine hält hierfür zwei Anschlüsse bereit (PL6, PL2). Das Programm selber wurde aus Zeitgründen vom c't-Lab Projekt mit übernommen. Es erfüllt im Wesentlichen alle Funktionen, die zum Einlesen von Messwerten und Ausgeben von Spannungen benötigt werden.

Weitere Anschlüsse der ADA-IO-Karte sind die Spannungsversorgung seitens der IFP-Platine (PL1), ein Anschluss für das Panel (PL5) und jeweils einen für die Kommunikation des Motherboards mit anderen Peripherie-Komponenten sowie der IFP-Platine. Die Spannungsversorgung des Controllers sowie aller anderen Komponenten, die mit der ADA-IO-Platine verwendet werden, und des Panels geschieht seitens der IFP-Platine. Das optionale Bedienpanel ermöglicht einen schnellen Überblick der Daten der A/D-und D/A Wandlerkarte sowie der I/O-Steckkarte. Mit dem Panel lassen sich schnell die einzelnen Kanäle der Wandlerkarten durchschalten bzw. Werte (D/A-Wandler) vorgeben.

4.5.2 Analog/Digital-Konverter (16Bit)

Der hier verwendete Analog/Digital-Wandler LTC1864 von Linear Technologies arbeitet mit einer 16Bit Auflösung über einen Spannungsbereich von -10V...+10V und mit einer Genauigkeit von 0,01%. Eingesetzt wird der Wandler bei der Auswertung der Pt100-Messwiderstände, die an verschiedenen Messpunkten im Prüfstand eingebaut sind und die Verlustleistung der zu erprobenden Wasserkühlung

an kritischen Punkten messen. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Messung der Umgebungstemperatur, ebenfalls mittels eines Pt-100-Messgliedes

4.5.3 Aufbau der Schaltung

Der Aufbau der A/D-Karte (siehe Anhang) ist in drei Teile gegliedert. Die analogen Eingangsdaten gelangen zunächst in einen Analogmultiplexer, der einen Kanal auswählt und auf den Eingangsverstärker, bestehend aus zwei OpAmp vom Typ AD712, schaltet. Von der Verstärkerschaltung gelangen die Spannungen zum A/D-Wandler und im Anschluss werden die Daten über die SPI-Schnittstelle zum Controller der ADA-IO-Platine gesendet und zwischengespeichert. Der ATmega32 übernimmt nicht nur die Speicherung, sondern auch die Ansteuerung des Analogmultiplexers sowie des Wandlers.

Das Herzstück der hier verwendeten Analog/Digital-Wandlerkarte ist der LTC1864 in Verbindung mit der Referenzspannungsquelle LT1019-2,5, da der Wandler keine interne Referenzspannungsquelle besitzt. Die Voraussetzung für ein korrektes Arbeiten des Wandlers ist die exakte Einstellung des LT1019-2,5 auf 2,56000V in Bezug auf die Kartenmasse. Dadurch erhält das Approximationsregister einen Referenzwert gegenüber der zu ermittelnden Eingangsspannung. Die hochpräzise Referenzspannungsquelle kann über einen Jumper dem Controller zur Verfügung gestellt werden; jedoch muss dann dabei die interne Referenzquelle abgeschaltet werden, da sie am gleichen Controllerpin anliegt.

4.5.4 Funktionsweise der Schaltung

Nach erfolgreicher Kalibrierung der Referenzspannungsquelle ist die A/D-Wandlerkarte funktionsbereit. Die bis zu acht Eingangskanäle gelangen zunächst in den Analogmultiplexer. Auf Grund des Preises von 13,80 Euro für den Wandler bietet es sich an, nur einen AD-Wandler im Multiplexverfahren zu verwenden.

Der Controller der ADA-IO-Karte wählt einen Kanal des Analogmultiplexers aus und schickt den Wert in Richtung Verstärkerendstufe. Der Eingangsverstärker besteht aus zwei nacheinander geschalteten FED OPamp vom Typ AD712. Der erste OPV ist in einer klassischen nichtinvertierenden Verstärkerschaltung aufgebaut.

Mit seiner Beschaltung lassen sich zwei Verstärkungsfaktoren von $v = 1$ und $v = 10$ realisieren. Erreicht werden sie, indem eine einfache Brücke mittels Jumper gesteckt ($v = 1$) bzw. gezogen ($v = 10$) ist. Nach der ersten Verstärkerschaltung gelangt das Signal auf einen Spannungsteiler.

Der Zweck des Spannungsteilers ist die Nutzung den Wandlers in den Spannungsbereichen -10V...0V sowie 0V...+10V. Aus diesem Grund wird die Referenzspannung bei einer Eingangsspannung (Spannung nach der ersten Verstärkerstufe) von 0V halbiert. Der entstehende Offsetfehler wird durch die Software eliminiert. Für unsere Belange ist dieses quasi bipolare Verhalten nicht von Bedeutung, da wir ausschließlich im positiven Spannungsbereich arbeiten. Es ist eher von Nachteil, da wir nur effektiv mit einem 15Bit Wandlerergebnis arbeiten anstatt mit den möglichen 16Bit Auflösung, die der Wandler leisten kann.

Nach dem Spannungsteiler kommt die zweite Verstärkerstufe; hier geschaltet als Impedanzwandler. Hierdurch wird erreicht, dass der Analogmultiplexer spannungsseitig am Ausgang minimal belastet und in der Spannungshöhe kaum verfälscht wird.

5 Umsetzung der Lüftersteuerung

5.1 Digital/Analog-Konverter (12Bit)

Der hier eingesetzte unipolar arbeitende D/A-Wandler (LTC 1257) wird für die Ansteuerung der Lüfter verwendet. Die Schaltung stellt acht Ausgangskanäle und die bipolaren Arbeitsspannungen von -10 bis 10V zur Verfügung. Angesteuert wird die D/A-Karte wie die A/D-Karte über einen von Hand programmierten SPI-Bus. Der Wandler könnte wahlweise auch durch einen 16Bit-Wandler ersetzt werden, was für unsere Belange jedoch zu überdimensioniert wäre.

5.1.1 Aufbau der Schaltung

Durch die Auswahlmöglichkeit der beiden Wandler (12 bzw. 16Bit) finden wir am Eingang der Schaltung zwei Dioden, über die der Controller erkennt, was für ein Wandler verbaut wurde. Ist der 12Bit D/A-Wandler verbaut, wird nur eine Diode verlötet (D1, DA12-8). An der Anode der Diode liegt eine Versorgungsspannung von 5V; die Kathode führt zum Eingang des LTC 1257. Wird nun an der Kathode der Diode ein Spannung von 5V angelegt, so zieht die Diode ihren Eingang auf log. Null. Der Controller vermerkt das Vorhandensein eines 12Bit-Wandlers. Parallel überprüft er die zweite Diode.

Der hier verwendete unipolar arbeitende Wandler liefert an seinem Ausgang einen maximalen Spannungshub von +2,56V, was für die vorgegebenen -10 bis 10V beschriebenen Angaben reicht. Dieses Problem entfernen die beiden nachgeschalteten OPamp-Verstärkerschaltungen. Das Signal wird durch einen Spannungsfolger nur im Strom angehoben, der am Ausgang durch einen Widerstand und einem Potentiometer, das zum Kalibrieren (in Verbindung mit einer Referenzspannungsquelle) der Verstärkerschaltung am Ausgang der Platine verwendet wird, verändert. Durch die durchgeschleifte Spannung liegt am Potentiometer immer die Spannung an, die vom D/A Wandler kommt, abzüglich des Spannungsabfalls am Vorwiderstand (R6, DA12-8). Durch Verändern des Widerstandes am Potentiometer verändert sich der Strom durch die Widerstände und im Ergebnis lässt sich dadurch die D/A-Karte kalibrieren. Die nächste

Verstärkerstufe ist ein Transimpedanzverstärker. Er wandelt den Eingangsstrom in eine proportionale Ausgangsspannung von max. $\pm 10V$

5.2 Aufbau der Lüfter- Treiberschaltung

Der Digital/Analog-Wandler liefert eine maximale Spannung von $\pm 10V$, wobei für unsere Anwendung nur der positive Spannungshub von Bedeutung ist. Die Lüfter benötigen jedoch zur völligen Aussteuerung 12V. Um dieses zu ermöglichen, wurde eine Lüftertreiberschaltung entworfen, mit der die Lüfter maximal angesteuert werden können. Der hier verwendete OPV (L272M) bietet nicht nur einen ausreichenden Spannungshub, sondern auch einen maximalen Ausgangsstrom von 1,5A, mit dem die Lüfter ausreichend versorgt werden können.

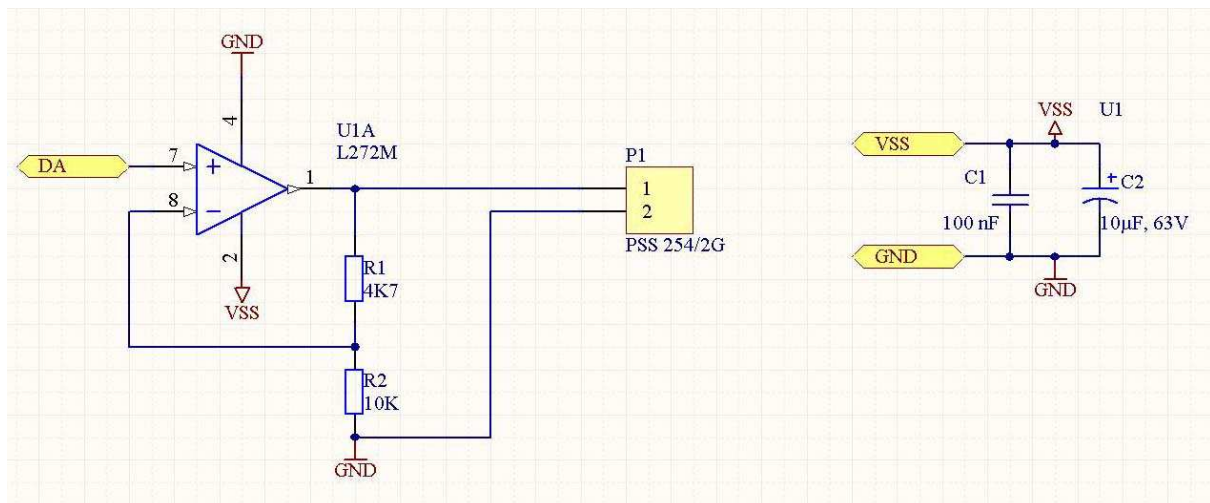


Abbildung 10: Schaltplan für Lüfter-Treiberstufe

Die benötigte Verstärkung des D/A-Signals wird mit einer nichtinvertierenden OPV-Schaltung (Abbildung 10: Schaltplan für Lüfter-Treiberstufe) erreicht. Rechts im Bild befindet sich die Beschaltung für die Spannungsversorgung des OPV mit den üblichen Stützkondensatoren, die der Übersicht halber wieder separat gezeichnet wurden. Das Verstärkungsverhältnis dieser nichtinvertierenden OPV-Treiberschaltung beschreiben die Widerstände R1 und R2.

Die Verstärkung berechnet sich in dieser Schaltung wie folgt:

Formel 8

$$v = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$
$$R_1 = 4700\Omega$$
$$R_2 = 10000\Omega$$

Formel 9

$$v = 1 + \frac{4700\Omega}{10000\Omega} = 1,47$$

Die maximale Ausgangsspannung beträgt:

Formel 10

$$U_a = U_e \cdot v = 10V \cdot 1,47 = 14,7V$$

Die angesteuerten Lüfter erreichen bei 12V ihre maximale Umdrehungszahl. Im voll angesteuerten Zustand gehen über die internen Transistoren des OPV ca. 0,7V (je nach Last) verloren. Abzüglich dieses Spannungsverlustes stehen 14V Ausgangsspannung für die Lüfter zur Verfügung, was eine sichere maximale Ansteuerung garantiert. Die Schaltung wurde so bemessen, dass die Lüfter voll angesteuert werden können. Die Lüfter werden zwar bei 12V voll angesteuert, vertragen jedoch bis 15V Eingangsspannung.

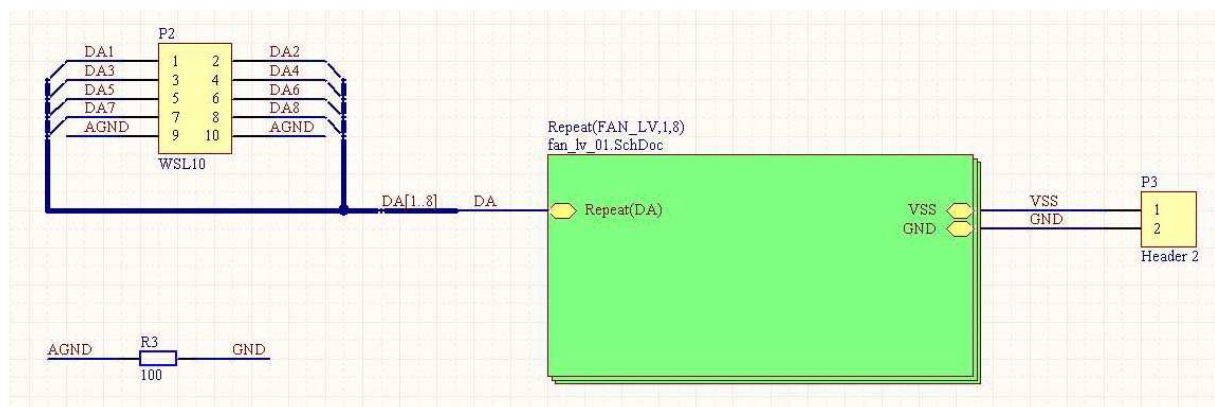


Abbildung 11: Ansteuerung der Lüfter-Treiber-Stufe durch den DAC

In Abbildung 11: Ansteuerung der Lüfter-Treiber-Stufe durch den DAC ist der Schaltplan für den Anschluss zum DAC (P2) zu sehen. Das Symbol für die 8-Fach-

Einkopplung der Treiberschaltung befindet sich in der Mitte der Schaltung (Repeat (FAN_LV, 1, 8)). Im Weiteren sind: Die Pfostensteckerverbindung (P3), die Spannungsversorgung der OPV sowie links unten die Verbindung der Analogmasse mit der Masse der Spannungsversorgung der OPV zu sehen.

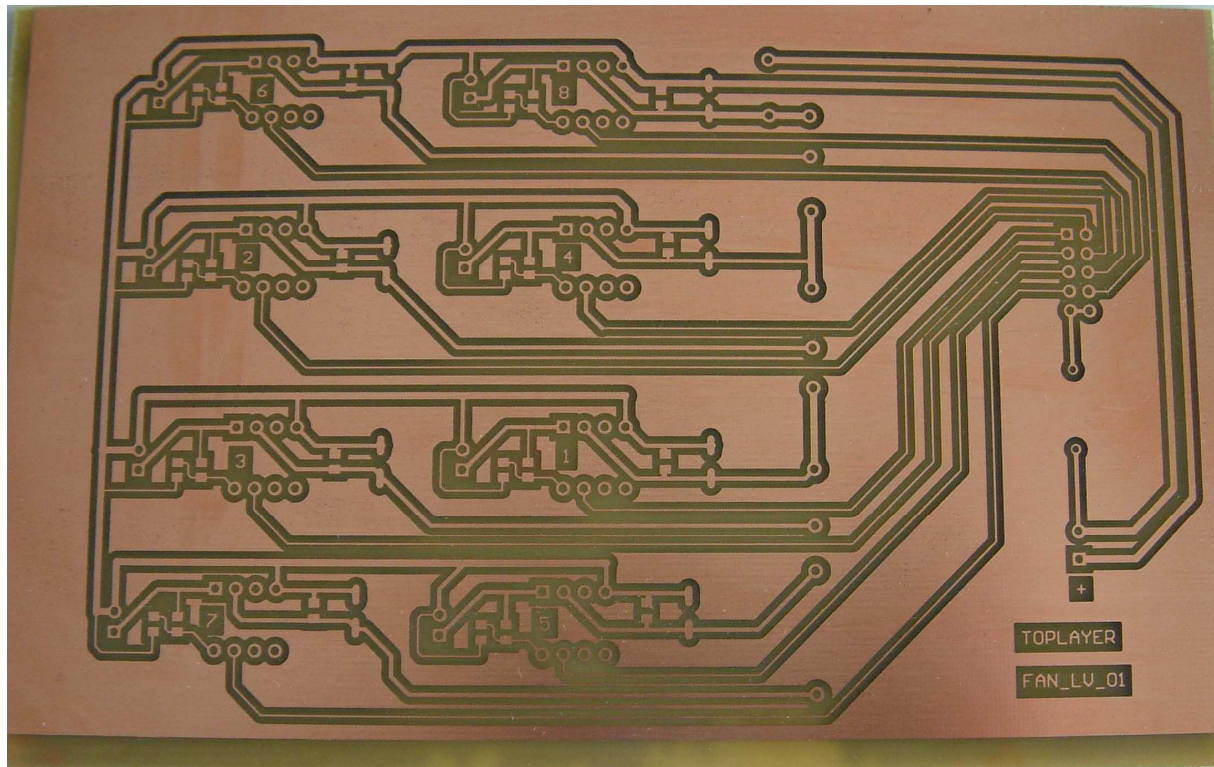


Abbildung 12: Layout FAN-Leistungsverstärker

6 Software

6.1 Vorstellung der Programmierumgebung von LabView

LabView ist eine graphische Programmierumgebung, in der mit der Programmiersprache „G“ programmiert wird. Ein Labview Programm wird als virtuelles Instrument (VI) bezeichnet.

Ein VI besteht aus den zwei Hauptbestandteilen Frontpanel und Blockdiagramm:

Das Frontpanel bekam seinen Namen, weil es an ein Frontpanel eines physikalischen Messgerätes erinnert. Es enthält graphische Steuer- und Bedienelemente wie Drehknöpfe, Schaltflächen sowie Graphen.

Das Blockdiagramm enthält die Programmierlogik, die mit LabView-eigener graphischer Programmiersprache realisiert wird. Die Bestandteile des Blockdiagramms sind untergeordnete VI, vordefinierte Funktionen, Konstanten und Ablaufstrukturen (Verzweigungen, Fallunterscheidungen sowie Schleifen). Das Steuerprogramm entsteht durch die Verbindung von VI und elementaren Operatoren. Frontpanelobjekte haben korrespondierende Anschlüsse im Blockdiagramm, sodass Daten vom Benutzer an das Programm und umgekehrt übergeben werden können.

6.2 Aufbau der Benutzeroberfläche



Abbildung 13: Bedienoberfläche

Die Bedienoberfläche unterteilt sich in drei Bereiche.

Oben links sind Anzeigeelemente für die verschiedenen Temperaturen untergebracht. T1 ist die Temperatur, die in den Prüfstand führt, T2 ist die Temperatur, die den Prüfstand verlässt. T3 misst die Umgebungstemperatur (Luft) und T4 ist für Erweiterungen vorgesehen. Für den Anwender ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Temperaturen für die Flüssigkeit und der Umgebungsluft von Bedeutung. Sie ist ein Indikator für die Leistungsfähigkeit der angeschlossenen Komponenten (Radiator, Wasserpumpe, Lüfter und deren Ansteuerung bzw. Kombinationen einzelner oder aller Komponenten).

Daraus ergab sich der zweite Bereich der Bedienoberfläche, das Diagramm im unteren Bereich. Es zeigt die Differenztemperaturen zwischen der Temperatur T1 und der Umgebungsluft T3 (weiße Kennlinie) sowie zwischen T2 und T3 (rote Kennlinie) an.

Der dritte Bereich (oben rechts) steuert die Lüfter an. Mit ihm können verschiedene Drehzahlen der Lüfter realisiert werden. Wird die Lüfterspannung erhöht, so erhöht sich die Drehzahl der Lüfter und dadurch der Luftstrom, der den Wärmetauscher kühlt. Der Nutzer kann derzeit drei verschiedene Lüftergruppen einzeln ansteuern.

6.3 Der Programmablaufplan

Der Programmablaufplan ist hier in einer Sequenzablaufstruktur untergebracht. Die Sequenzstruktur besteht im einfachsten Fall aus einem Rahmen, in dem die Funktion untergebracht wird. Durch Hinzufügen weiterer Rahmen können weitere Funktionen definiert werden. In unserm Fall besteht die Struktur aus 9 Rahmen, welche nacheinander ausgeführt werden. Ist der letzte Rahmen ausgeführt worden, verlassen die Daten die Struktur Richtung Messsystem. Innerhalb der Sequenzablaufstruktur stehen die Daten den jeweils folgenden Rahmen sofort zur Verfügung.

Da die Sequenz-Struktur nur einmalig durchlaufen werden würde, ist sie in einer While-Schleife untergebracht, die solange den Wert True liefert, solange der Bediener nicht in der Menüleiste die Abbruchbedingung „Stopp“ anklickt. Der Messzyklus beträgt 500ms.

Daten, die am Eingang der Sequenzstruktur bereitgestellt werden, stehen allen Rahmen und deren Funktionen zur Verfügung.

6.4 Vorstellen der einzelnen Sequenz-Strukturen und deren SubVI

6.4.1 Abfrage ADC (10Bit) Lüfterspannungen

Die Abfrage der Lüfterspannungen dient der Überprüfung der eingestellten Vorgaben für jeden einzelnen Lüfter.



Abbildung 14: Abfrage ADC (10Bit) der Lüfterspannungen

Das hier gezeigte Bild zeigt den Rahmen Null der Sequenz-Struktur, eingebettet in einer While-Schleife. Das Blockschaltbild liest mit Hilfe des internen 10-Bit Wandlers, des AT-Mega32-Mikrocontrollers, die Spannungen der Lüfter aus und schreibt sie in ein Array, dass die Spannungen, siehe Abbildung 14: Abfrage ADC (10Bit) der Lüfterspannungen, unter der Beschriftung „Lüfterspannungen“ kalibriert und umgerechnet wieder ausgibt. Die Umrechnung der Werte erfolgt unter der Überschrift 6.4.6 Ausgabe der Lüfterspannungen.

Die FAN-Leistungsverstärker-Platine ist für max. 8 Lüfter ausgelegt, jedoch werden derzeit im Messsystem nur 3 Lüftereinheiten angesteuert.

Das Blockschaltbild zeigt eine FOR-Schleife, die achtmal durchlaufen wird. Eine Konstante mit dem Wert 50 wird mit dem Integrationszähler der Schleife addiert und mit dem Eingang SubCh des SubVI's verbunden. Der μ C aus dem c't-Projekt verfügt über eine interne Moduladresse (alle anderen Module ebenfalls) sowie Subchannel-Adressen, mit denen die verschiedenen Kanäle (z.B. interner ADC des μ C, mit Auswahl des entsprechenden Pin's vom jeweiligen ADC-Channel) angesprochen werden können.

In unserem Fall wird mit einer Konstanten eine Null in den Eingang „Modul“ des SubVI's geschrieben und somit die ADA-IO-Karte selbst angesprochen. Der Subchannel (SubCh) 50 bis 57 repräsentiert die internen ADC-Kanäle des Controllers. Beim ersten Schleifendurchgang wird der Subchannel 50+0 abgefragt, beim zweiten 50+1 usw..

Nach der vollständigen Schleifeniteration werden die gesammelten Daten am Tunnel (rechte Seite: Ausgang der FOR-Schleife) zur Weiterverarbeitung bereitgestellt. Die acht internen ADC-Kanäle des Controllers zeigten ohne Anlegen einer Eingangsspannung eine Offsetspannung an. Dieser Offsetfehler wurde für jeden ADC-Kanal definiert, als Konstante hinterlegt und vom eigentlichen Wert aus der FOR-Schleife subtrahiert. Nach dem Eliminieren des Offsetfehlers wird der Wert in dem Array (ADC_FAN) abgelegt.

6.4.2 Abfrage ADC (16Bit) Pt-100_Messkarte

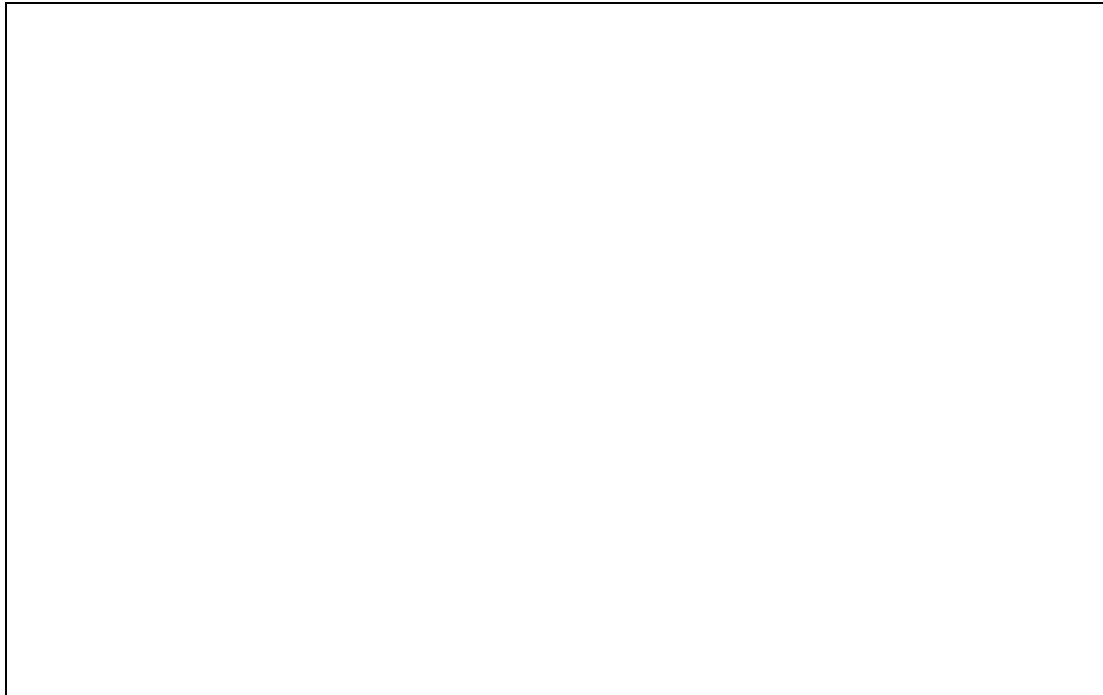


Abbildung 15: Abfrage ADC (16Bit) Pt100 Messkarte

Nach der Abfrage der Lüfterspannungen im Rahmen Null der Sequenzstruktur, werden jetzt (im Rahmen eins) die Pt100-Messwiderstände ausgelesen. Die Struktur ist ähnlich der vorangegangenen.

Das Blockschaltbild zeigt wieder eine FOR-Schleife, die achtmal durchlaufen wird. Eine Konstante, die am Eingang der FOR-Schleife steht, wird mit dem Iterationszähler addiert und somit werden wieder die Subchannels (hier 60 bis 67, Abfrage AD16-8-Karte) durchlaufen sowie ausgelesen. Der Mainchannel des SubVI wird wieder mit „0“ initialisiert und somit die ADA-IO-Karte direkt angesprochen. Der Tunnel am Ausgang stellt die Daten nach den acht Durchläufen wieder bereit. Im Anschluss werden die Daten in das Array „ADC_TEMP“ geschrieben.

6.4.3 Vorgabe der Lüfterspannungen



Abbildung 16: Ausschnitt Bedienpanel (Lüftersteuerung/Überwachung)

Die Vorgabe der Lüfterspannungen wird mittels eines numerischen Schiebers (links im Bild) sowie einer numerischen Eingabe realisiert. Beide Elemente sind miteinander verbunden, sodass beim Verändern des Wertes mit dem Schieber die numerische Anzeige den Wert des Schiebers annimmt und umgedreht.

In Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen ist das dazugehörige Blockschaltbild für Abbildung 16: Ausschnitt Bedienpanel (Lüftersteuerung/Überwachung) zu sehen. Die Funktion für das Einstellen der Lüfterspannungen ist im Sequenzrahmen 2 untergebracht. Dieses Blockschaltbild korrespondiert mit Abbildung 16: Ausschnitt Bedienpanel (Lüftersteuerung/Überwachung) insoweit, als dass die Funktionen „Vorgabe“ (Schieber, numerische Anzeige) sowie die Funktion „on/off“ (rechts im Bild) dort bearbeitet werden. Die Funktion für die realen Lüfterspannungen wird unter der Überschrift 6.4.6 Ausgabe der Lüfterspannungen bearbeitet.

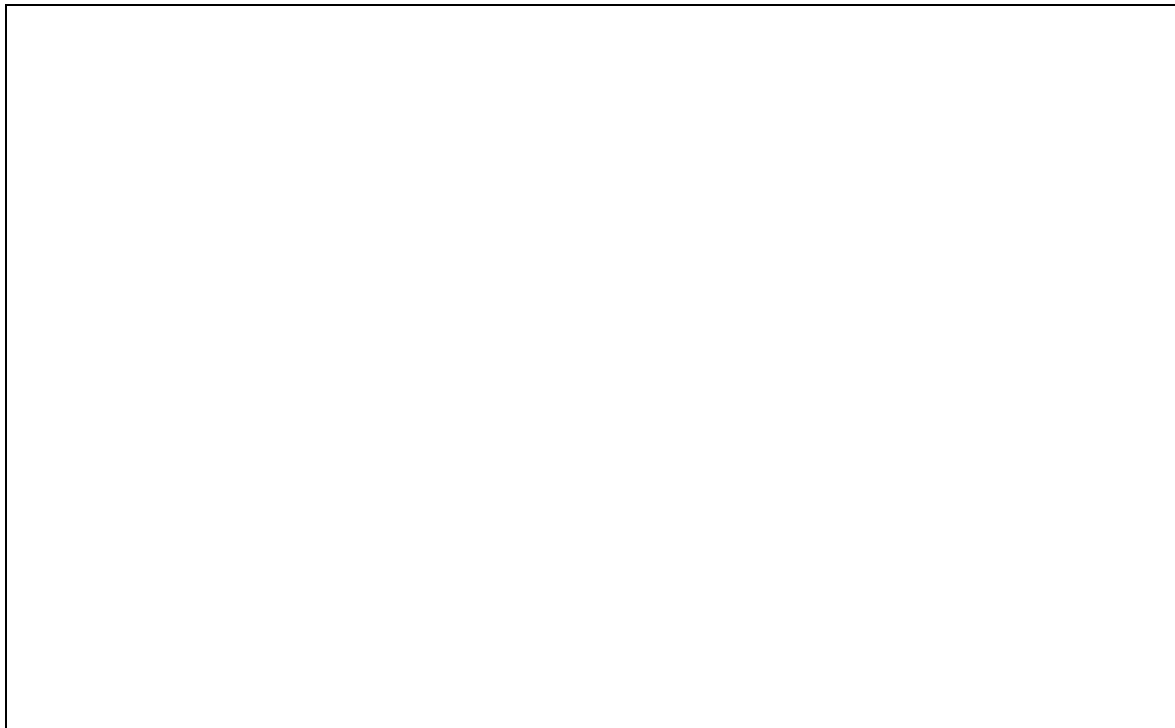


Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen

Das Blockschaltbild (Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen) zeigt am Anfang den numerischen Anschluss (links oben), der entsteht, wenn ein Symbol, wie der des numerischen Schiebers, in die Schaltfläche des Frontpanels gezogen wird. Diese Wertvorgabe ist vom Datentyp Double precision (Fließkomma, Farbe: orange). Die on/off Funktion zur Auswahl eines oder mehrerer Lüfter ist vom Datentyp Bool (B3...B8). Da in LabView nur gleiche Datentypen miteinander verbunden werden können, wird dieser Boolesche Wert in einen Integer Wert (0 für false bzw. 1 für true) umgewandelt. Anschließend werden die Werte für die Vorgabe mit der Auswahl des Lüfters multipliziert und mit Hilfe der Funktion Array erstellen die Daten in das Array „A_FAN“ geschrieben.

Die ersten beiden Arrayelemente wurden mit Null initialisiert, weil die ersten beiden AD-Kanäle des Controllers für die Benutzung des angebundenen Bedienpanels reserviert werden.

6.4.4 Übertragung der Lüfterspannungen ins Messsystem

Der nächste Rahmen der Sequenzstruktur befasst sich mit der Übertragung der benutzerdefinierten Lüfterspannungen ins Messsystem. Diese Funktion zeigt die Verwendung von drei ineinander Verschachtelten VI's.



Abbildung 18: Übermittlung der Fan-Spannungen ins Messsystem

Die Abbildung 18: Übermittlung der Fan-Spannungen ins Messsystem zeigt, dass das Blockschaltbild des aus 6.4.3 Vorgabe der Lüfterspannungen erzeugten Array, welches seine Werte in das SubVI „A_FAN_V_IN“ weiter gibt.

In Abbildung 19: SubVI FAN-Control wird die dahinter versteckte Funktionalität sichtbar. Das Blockdiagramm sowie das Frontpanel „fan_control_01“ gibt die Logik des SUBVI „A_FAN_V_IN“ wieder. Das SubVI bekommt seine Daten aus dem 1D-Array A_FAN, welches 8 Elemente vom Datentyp Fließkommazahl enthält. Diese acht Elemente werden mittels Tunnel an das VI „CTLAB-SetVAL_01“ weiter gegeben. Aus Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen wird ersichtlich, dass jedes Element nur einzeln weiterverarbeitet werden kann. Dazu nutzen wir wieder die For-Schleife mit dem integrierte Iterationszähler zum Auswählen der entsprechenden Subchannels.

Die FOR-Schleife enthält das SubVI „CTLAB-SetVAL_01“, das uns 6 Eingänge und 2 Ausgänge zur Weiterverarbeitung bietet.

Eingänge	
error in	Fehlerverwaltung Eingang [enthält alle Fehler, die vor Ausführung dieses VI's bzw. dieser Funktion aufgetreten sind. Beim Auftreten eines Fehlers wird der Fehler (Eingang) an Fehler (Ausgang) weitergegeben. Ein Fehler vor der Ausführung des VI's führt zum Abbruch; ein Fehler während der Ausführung führt zur Abänderung des Fehlerstatus Fehler (Ausgang)]
mainChannel	Auswahl des Moduls im Messsystem, 0 = ADA-IO-Platine
number	Weitergabe der einzelnen Elemente aus dem Array „A_FAN_V_IN“
SubChannel	Auswahl des entsprechenden Subkanals
VISA resource	Auswahl der Datenschnittstelle am PC, hier COM1
Ausgänge	
dup VISA	LabView intern: Vergabe eines Namens für die VISA Ressource zum Zwecke der Kommunikation mit einer Ressource
error out	Fehlerverwaltung vom Eingang an den Ausgang; Beschreibung des Fehlerstatus, der durch dieses VI verursacht wurde

Im Blockdiagramm „fan_control_01“ werden die Werte des 1D Array weitergegeben, das Modul des Messsystems ausgewählt (mit Null initialisiert und somit die ADA-IO-Platine ausgewählt) sowie die SubChannel 20 bis 27 (Ausgabewerte der DA12-8-Karte, 8-Kanäle) angesprochen.

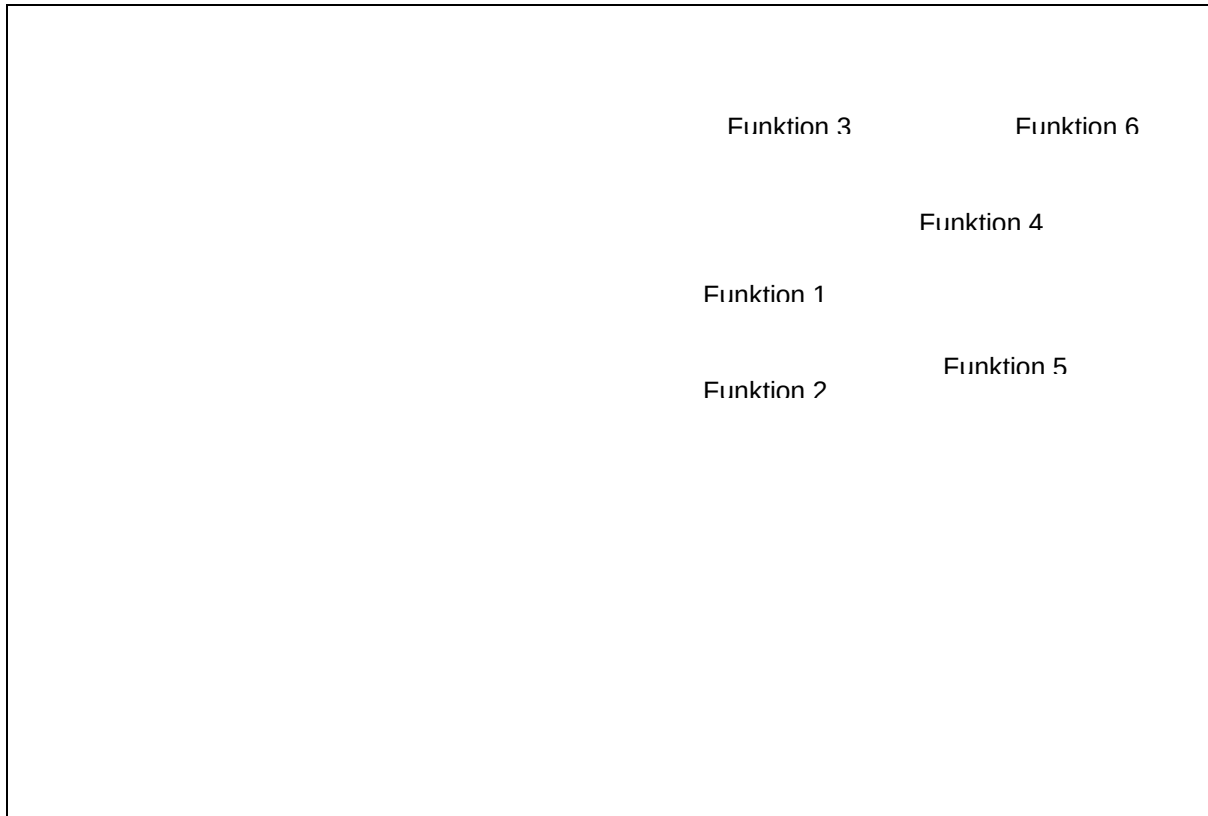


Abbildung 19: SubVI FAN-Control

In Abbildung 19: SubVI FAN-Control sind auf der rechten Seite das Frontpanel und das Blockdiagramm des „Sub“SubVI CTLAB-SetVal_01.vi, welches im VI „fan_control_01“ mit Werten versehen wurde, zu sehen.

Die Funktionen 1, 2 und 3 (siehe Abbildung 19: SubVI FAN-Control) sind von LabView bereitgestellte Objekte, die Zahlen, Arrays, Cluster oder numerische Zahlen in einen String konvertieren. Funktion 1 wandelt den numerischen Wert des MainChannels in einen String um, die Funktion 2 den numerischen Wert des SubChannels und die Funktion 3 die numerischen Werte des 1D-Arrays in eine Fließkommazahl um.

Bei Funktion 3 muss noch die Genauigkeit des Arrays mit angegeben werden, da der Wert aus dem Array mit doppelter Genauigkeit definiert wurde.

Mit Hilfe der Funktion 4 werden einzelne Strings zu einem String zusammengefügt, sodass nur noch ein einzelnes Anzeigeelement notwendig ist für eine Vielzahl von Datenflüssen. LabView stellt hier Objekte zur Verfügung, die entsprechend den Anforderungen des Benutzers eine Vereinzelung der zusammengefassten Strings wieder ermöglichen.

Das Objekt 5 (VISA Ressource) ist ein Objekt, das von LabView bereitgestellt wird, um Peripheriekomponenten direkt über definierte Schnittstellen anzusprechen.

VISA-Ressource überträgt die umgewandelten Daten vom Schreibpuffer an das Gerät (Messsystem). Der Schreibpuffer (Eingang VISA-Ressource) erhält seine Daten aus der Funktion 4. Die Daten werden jetzt über die definierte Schnittstelle des PC (wird in VISA-Ressource vorher festgelegt, hier: COM1, asynchroner Datentransfer über RS232) an das Messsystem übertragen.

Die vom Benutzer definierten Lüfterspannungen passieren jetzt die ADA-IO-Platine und gelangen über die SubChannels 20...27 an die Ausgänge der Digital/Analog-Karte. Im Anschluss an die Eingänge der FAN-Treiberendstufe und von hier aus direkt zu den Lüftern.

Eine Rückkopplung des Datenflusses gibt es nur indirekt über die Abfrage der Lüfterspannungen, siehe 6.4.1 Abfrage ADC (10Bit) Lüfterspannungen.

Die Funktion „millisecond delay“ (Abbildung 17: Vorgabe FAN-Spannungen, SubVI CTLAB-SetVal_01, Blochschalbild, Frontpanel) wartet, bis der Millisekunden-Timer ein Vielfaches der voreingestellten ms (hier 8ms) erreicht hat. Diese Funktion dient der Synchronisation der Datenübertragung der asynchronen Schnittstelle mit den internen Vorgängen von LabView.

6.4.5 Mittelwertbildung der Lüfterspannungen

Der Sequenzrahmen 4 befasst sich mit der Pufferung sowie der Mittelwertbildung der Lüfterspannungen, die im Rahmen 0 ausgelesen und im Array „ADC_FAN“ abgelegt worden sind. Die Werte werden gepuffert und anschließend wird aus ihnen ein Mittelwert gebildet. Dies geschieht für jeden einzelnen Wert separat.

In Abbildung 20: Berechnung der ADC(10Bit) FAN-Spannungen wird der Wert der Lüfterspannungen an das SubVI 6 übergeben sowie eine Konstante vom Programmierer definiert.

Diese Konstante (0,0145675) berechnet sich aus dem Verhältnis der Referenzspannungsquelle durch Auflösung (ADC des Controllers) multipliziert mit dem Vorteiler. Die exakte Berechnung erfolgt unter der Teilüberschrift „Berechnung der 10Bit-Werte“ vom Controller.

Die Konstante berechnet sich dann wie folgt:

Formel 11

$$0,002502444 \frac{V}{ink} \times 5.82 = 0,01456 \frac{V}{ink}$$

Dieses SubVI enthält zwei Eingänge sowie einen Ausgang. Der obere Eingang (links) definiert die gewünschte Pufferlänge und der untere (links) übernimmt die Daten aus dem Array, in dem die Werte für die ausgelesenen FAN-Spannungen hinterlegt sind.

Die gemittelten Spannungswerte der Lüfter, die aus dem SubVi 6 bereitgestellt werden, werden mit der Konstante multipliziert und im Anschluss in dem Array „ADC_FAN_MEAN_VOLT“ abgelegt.

Formel 12

$$gemittelter_ADC_Wert[ink] \times 0,01456 \frac{V}{ink} = Lüfterspannung[V]$$

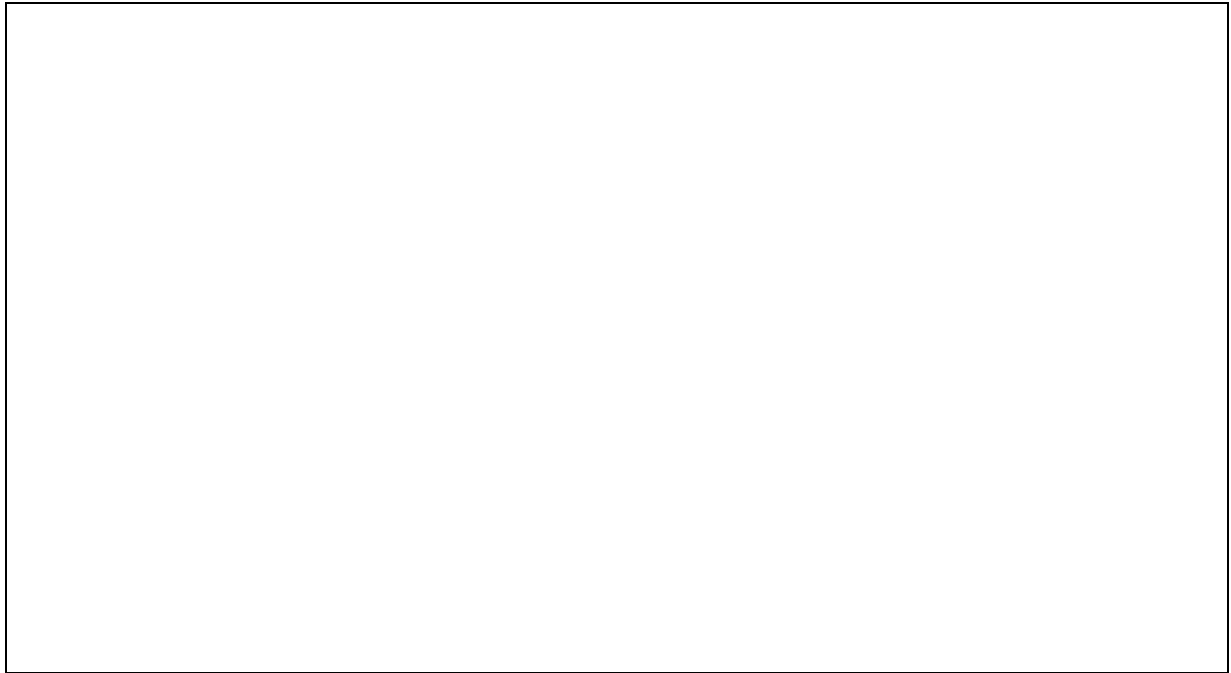


Abbildung 20: Berechnung der ADC(10Bit) FAN-Spannungen

Springen wir nun in das SubVI 6 hinein.

Der Datenausgang (rechts) beinhaltet ein Array (OUTPUT_ARRAY), welches innerhalb des SubVI 6 angelegt wurde. Um der Systematik keinen Abriss zu verschaffen, gleicht die Erklärung dieser Sequenz der Arbeitsweise von LabView.



Abbildung 21: Extrahieren der Eingangswerte in Einzelelemente

In Abbildung 21: Extrahieren der Eingangswerte in Einzelelemente sehen wir das Blockschaltbild des SubVI 6 (erkennbar an dem Symbol oben rechts im Fenster). Die zwei Eingangswerte Bufferlänge und ADC_FAN = INPUT_ARRAY stehen als Anfangswerte für den weiteren Funktionsverlauf.

INPUT_ARRAY enthält die acht Werte des ADC (FAN3, 4, 5). Die LabView-Funktion, die den gesammelten Datenstring dieses Arrays aufnimmt, extrahiert die acht Einzelstrings und bietet somit den weiteren Funktionen die Möglichkeit, jeweils einen Wert separat zu bearbeiten.

Betrachten wir nun das SubVI 4 in Abbildung 22: SubVI Ringpuffer. Dieses VI besteht wieder aus zwei Eingängen und einem Ausgang. Der obere Eingang (links), erhält den Wert von z.B. Lüfter 3 und der untere Eingang (links) die bis hierher durchgereichte Pufferlänge.

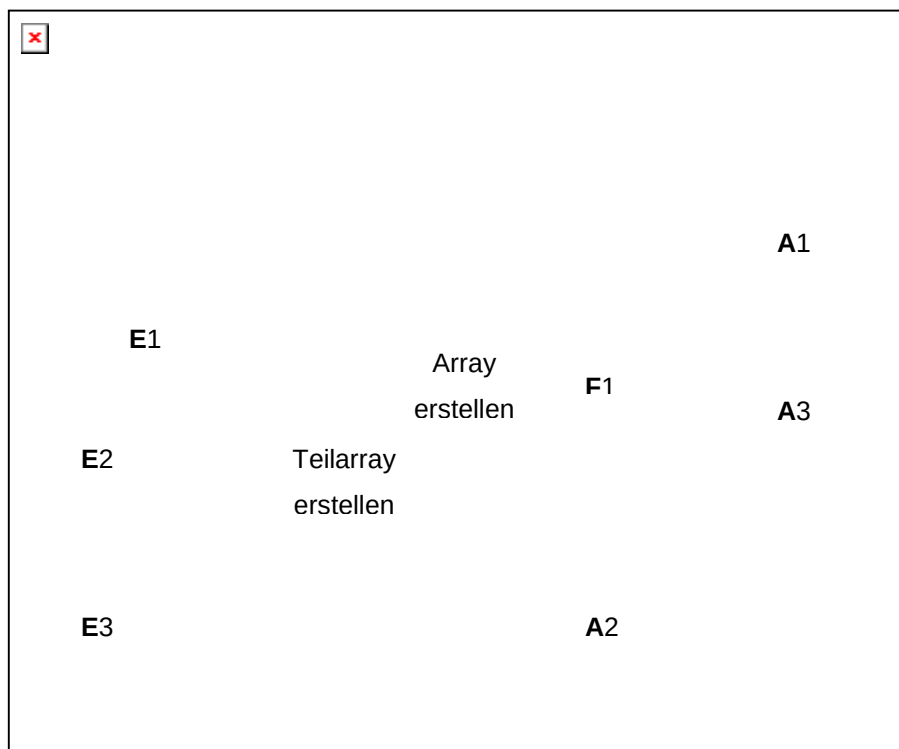


Abbildung 22: SubVI Ringpuffer

In Abbildung 22: SubVI Ringpuffer sind diese zwei Eingangswerte im Blockschaltbild wieder zu erkennen. „Input“ steht für den jeweiligen Wert und „Bufferlänge“ für die Anzahl der zwischengespeicherten Einzelwerte.

In diesem SubVI 4 findet die eigentliche Pufferung und Mittelwertbildung statt. Die Eingänge E1 sowie E3 spiegeln die bisher durchgereichten bzw. durchgereichten und extrahierten Eingangsdaten wieder.

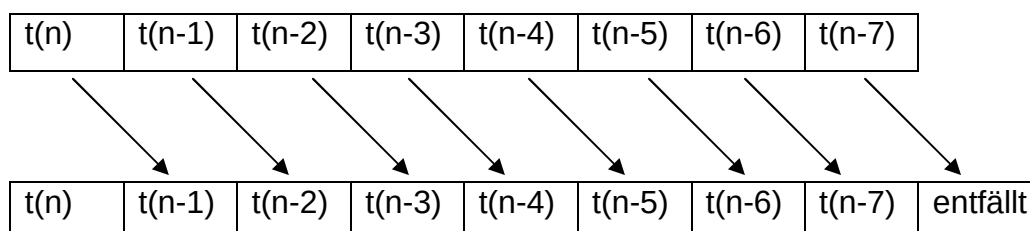
Die Ausgänge A1, A3 und A2 sind beim ersten Durchgang mit den Werten Null indiziert. Nach dem ersten Durchgang der Sequenzstruktur steht für jeden Lüfter ein Wert zur Verfügung.

Beim ersten Durchgang der Sequenzstruktur wird zuerst der Wert, der im Array „Output_Array“ steht, in die Funktion „Teilarray erstellen“ geschrieben. Gleichzeitig wird das Array „Teilarray erstellen“ mit den Werten Null für den Startindex sowie dem Pufferwert minus 1 indiziert.

Danach wird der neue Lüfterwert eingelesen und in die Funktion „Array erstellen“ geschrieben (Index 0).

Beim zweiten Durchgang wird der Wert von „Array erstellen“ in das Array „Output_Array“ geschrieben, „Teilarray erstellen“ wird wieder mit dem Startindex sowie der Pufferlänge indiziert. Der Wert in „Output_Array“ wird in „Teilarray erstellen“ geschrieben.

Im Anschluss wird der neue Lüfterwert eingelesen und in „Array erstellen“ auf Index 0 abgelegt.



„Array erstellen“ bekommt jetzt den Wert von „Teilarray erstellen“.

Dadurch wird immer der letzte Wert ($t(n-7)$) von „Teilarray erstellen“ durch den vorherigen ($t(n-6)$) überschrieben.

Die Funktion „Array erstellen“ ermöglicht es, Elemente an ein bestehendes Array anzufügen im Gegensatz zur Funktion „Teilarray erstellen“. Diese Funktion gibt ein Teilarray aus, welches aus einem existierendem Array sowie angehängter Elemente besteht. Die Größe dieses Arrays wird durch den Eingang E3 (Bufferlänge) bestimmt. Von der Bufferlänge wird 1 subtrahiert, da beim ersten Durchgang der Wert 0, der sich im „Output_Array“ befand, in das Teilarray geschrieben wird.

Der Eingang E4 gibt an, ab welchem Index das Array beginnt. In unserem Fall befindet sich der Anfang bei Index 0.

In „Teilarray erstellen“ werden die letzten 8 Eingangswerte zwischengespeichert. Mit diesem Array wird eine arithmetische Mittelwertbildung durchgeführt. Durch die Mittelwertbildung werden kleine positive und negative Spannungsänderungen der Lüfter eliminiert und nur der arithmetische Mittelwert ausgegeben.



Die Mittelwertbildung erfolgt mit der von LabView bereitgestellten Funktion „mean“.

Nach den ersten 8 Durchläufen der Sequenz-Struktur ist das System eingeschwungen und arbeitet mit den letzten 8 Eingangsdaten des jeweiligen Lüfters.

Abbildung 23: Berechnung Mittelwert

Dieser Mittelwert, der 3 angeschlossenen Lüftereinheiten SubVI 4 berechnet und im SubVI 6 wieder zu einem Array zusammengeführt. Diese Mittelwerte liegen jetzt im Feld „OUTPUT_ARRAY“ bereit.

Betrachten wir nun den Sequenz-Rahmen 4 in Abbildung 20: Berechnung der ADC(10Bit) FAN-Spannungen. Die berechneten und zusammengeführten Mittelwerte stehen jetzt am Ausgang des SubVI 6 zur Verfügung. Diese bisher betrachteten Werte entsprechen der Auflösung vom μC in Inkremente.

Berechnung der 10Bit-Werte vom Controller:

Auf Grund der Referenzspannungsquelle des μC kann der interne A/D-Wandler nur gemessene Spannungen von max. 2,56V messen. Unsere Lüfter können jedoch mit bis zu 14V angesteuert werden. Dementsprechend wurde ein Widerstandsvorteiler vor den 8 AD-Kanälen des Controllers implementiert. Der Vorteiler wurde so bemessen, dass die maximalen 14,7V gemessen werden können.

$$V_{Ref} = 2,56V$$

$$Auflösung = 1024 \text{ink} (10\text{Bit} - \text{Wandler})$$

Daraus ergibt sich:

Formel 13

$$\frac{V_{Ref}}{Auflösung} = \frac{2,56V}{1024 \text{ink}} = 0,0025 \frac{V}{\text{ink}}$$

Der vorhandene Vorteiler:

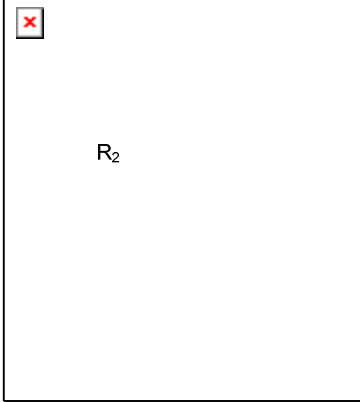
	Formel 14 $\frac{U_{ADC_ (10BIT)_ IN}}{U_{FAN}} = \frac{R_{15}}{R_{15} + R_2}$ Nach $U_{ADC_ (10BIT)_ IN}$ umgestellt: Formel 15 $U_{ADC_ (10BIT)_ IN} = U_{FAN} * \frac{R_{15}}{R_{15} + R_2}$ Formel 16 $U_{ADC_ (10BIT)_ IN} = 10V * \frac{100K}{100K + 300K}$ $U_{ADC_ (10BIT)_ IN} = 2,5V$
---	---

Abbildung 24: Vorteiler der IO8-32_Karte

Der angepasste Vorteiler:

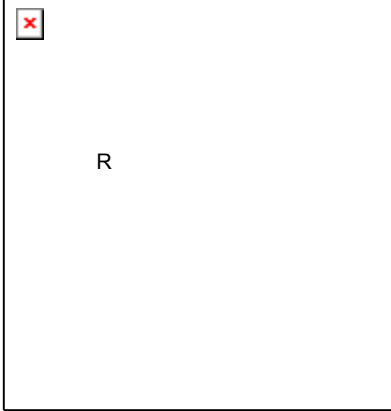
	$\frac{U_{ADC_{(10BIT)}_{IN}}}{U_{FAN}} = \frac{R_{15}}{R_{15} + R_2}$ Nach $U_{ADC_{(10BIT)}_{IN}}$ umgestellt: $U_{ADC_{(10BIT)}_{IN}} = U_{FAN} * \frac{R_{15}}{R_{15} + R_2} = U_{FAN} * \text{Vorteiler}$ Formel 17 $U_{ADC_{(10BIT)}_{IN}} = 14,7V * \frac{56K}{56K + 270K}$ $U_{ADC_{(10BIT)}_{IN}} = 2,52V$
---	---

Abbildung 25: Der angepasste Vorteiler

Formel 18

$\text{Vorteilerfaktor} = 14,7V \div 2,56V = 5,74 \rightarrow$ gewählt: 5,82 (aufgrund der Widerstandsbaureihen)

Daraus ergibt sich die maximal auszulesende Spannung von:

Formel 19

$$5,82 \times 2,56V = 14,8992V$$

Im Sequenz-Rahmen 0 wurden die ADC-Werte ausgelesen und im Rahmen 4 gemittelt.

Diese Werte werden in Abbildung 20: Berechnung der ADC(10Bit) FAN-Spannungen mit der Konstante 0,0145675 multipliziert. Diese Konstante berechnet sich aus dem Verhältnis der Referenzspannungsquelle durch Auflösung (ADC des Controllers) multipliziert mit dem Vorteiler.

$$\text{Konst.} = \frac{2,56V}{1024_{ink}} \times 5,82$$

$$\text{Konst.} = 0,01456 \frac{V}{ink}$$

Die Lüfterspannungen berechnen sich dann wie folgt:

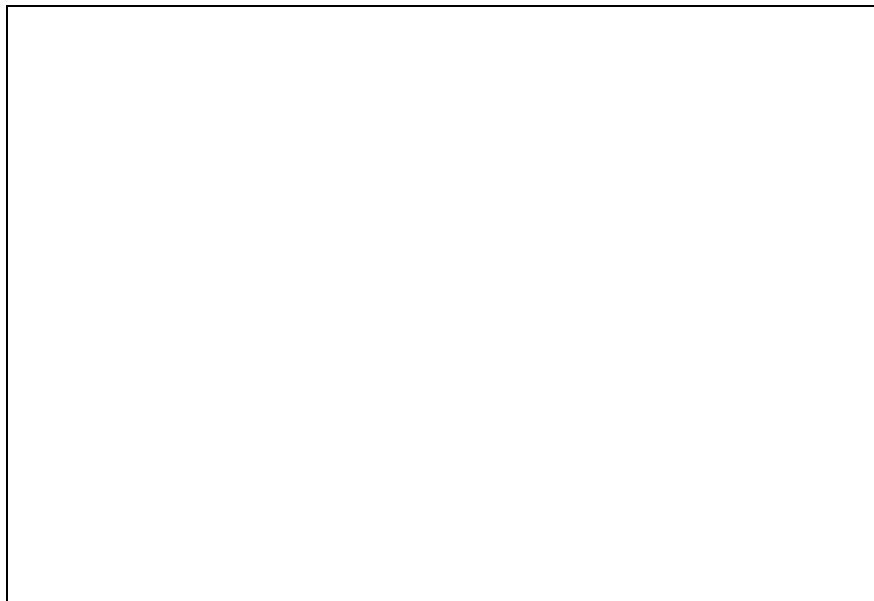
Formel 20

$$\text{gemittelter_ADC_Wert}[\text{ink}] \times 0,0025 \frac{\text{V}}{\text{ink}} \times 5.82 = \text{Lüfterspannung}[\text{V}]$$

$$\text{gemittelter_ADC_Wert}[\text{ink}] \times 0,01456 \frac{\text{V}}{\text{ink}} = \text{Lüfterspannung}[\text{V}]$$

Die Ausgabe der Lüfterspannungen erfolgt in das Array „ADC_FAN_MEAN_VOLT“ und steht jetzt für die Funktion im Sequenz-Rahmen 5 „Ausgabe Lüfterspannungen“ zur Verfügung.

6.4.6 Ausgabe der Lüfterspannungen



Die Ausgabe der Lüfterspannungen ist die visuelle Rückkopplung der realen Spannungen der 3 verwendeten Lüfter.

Abbildung 26: Ausschnitt Bedienpanel

Der Sequenz-Rahmen 5 bekommt seine Eingangswerte über das Array „ADC_FAN_MEAN_VOLT“.

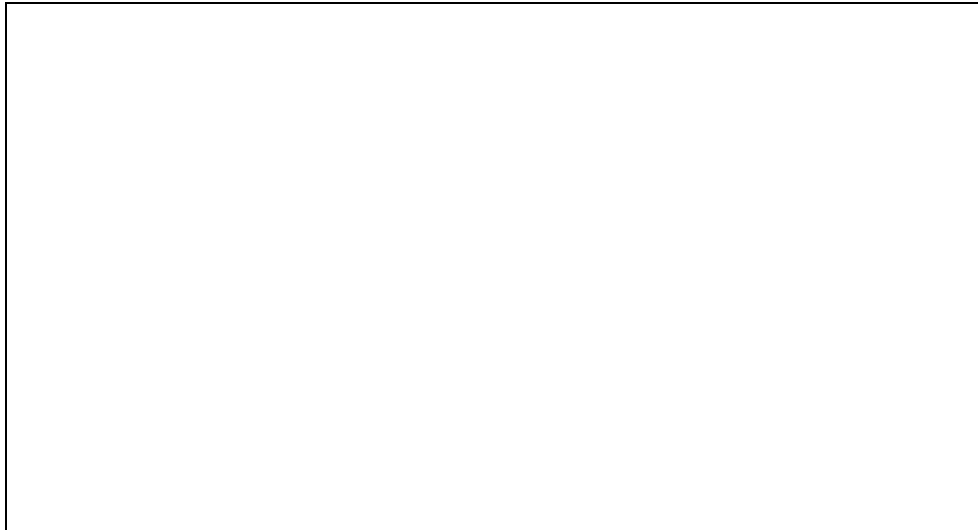


Abbildung 27: Ausgabe Lüfterspannungen

Dieses Array wird im SubVI 1, siehe Abbildung 28: Blockdiagramm SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen), der LabView-Funktion „Array indizieren“ zugeführt. Mit Hilfe dieser Funktion lässt sich das Array, bestehend aus 8 Elementen, vereinzeln. Diese 8 Einzelwerte werden an den Ausgängen (rechts) mit einem Schieber zur visuellen Ausgabe verbunden. Siehe Abbildung 28: Blockdiagramm SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen) und Abbildung 29: Frontpanel SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen)

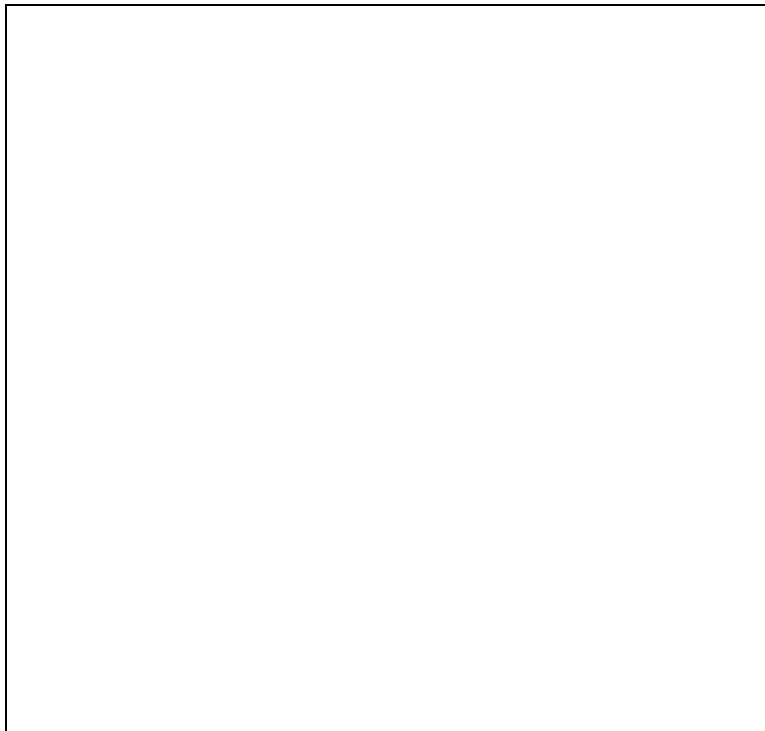


Abbildung 28: Blockdiagramm SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen)

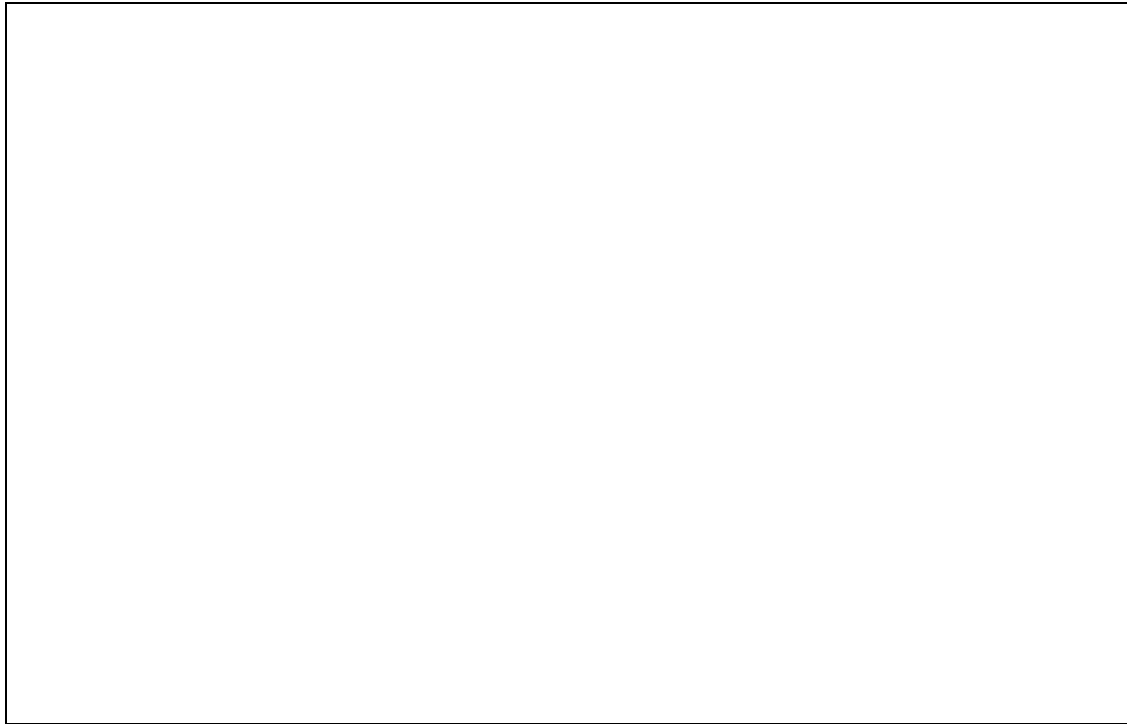


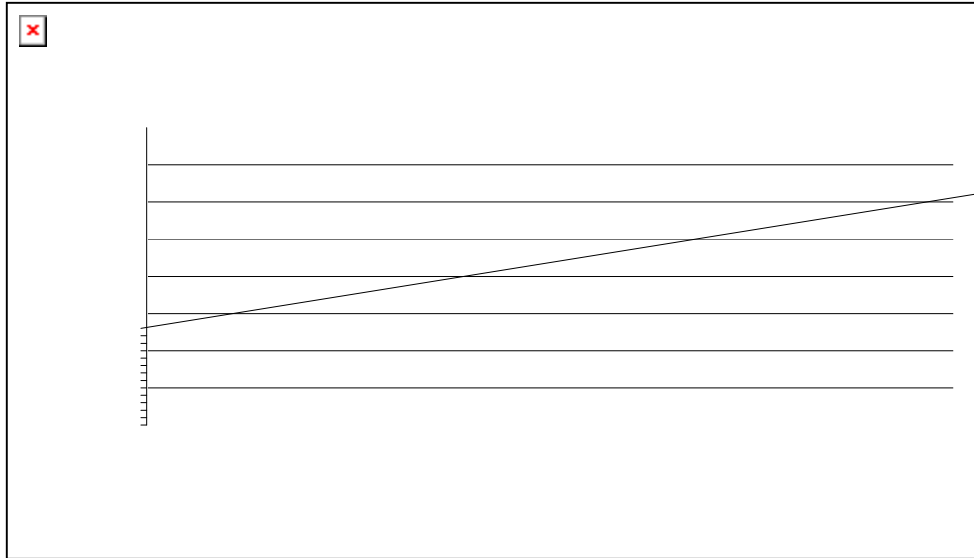
Abbildung 29: Frontpanel SubVI 1 (Ausgabe der Lüfterspannungen)

Diese Ausgänge wurden, mit Ausnahme FAN1 und FAN2, im Bedienpanel mit eingebunden.

Die Abfrage der Lüfter 1 und 2 ist durch das angeschlossene Bedienpanel derzeit nicht möglich. Die ersten beiden AD-Kanäle des Controllers der ADA-IO-Karte sind für das Bedienpanel reserviert (wäre es nicht angeschlossen, könnten die beiden Kanäle mit benutzt werden).

6.4.7 Berechnung der Widerstandswerte und Temperaturen für die PT-100-Elemente

Im Sequenzrahmen 6 findet die Auswertung der gemessenen Spannungen der Pt-100-Messwiderstände statt. Die Spannungsänderung ist nahezu proportional der Temperaturänderung des Widerstandes.



Die Eingangswerte der folgenden Funktion sind die 15Bit Wandlerwerte der AD16-8-Karte. Diese Werte werden, wie in Abbildung 30: Berechnung der Widerstands und Temperaturwerte der Pt100-Messglieder ersichtlich wird, werden aus dem Array „ADC_TEMP“ die Mittelwerte gebildet (durchlaufen des SubVI 6).



Abbildung 30: Berechnung der Widerstands und Temperaturwerte der Pt100-Messglieder

Die Mittelwerte werden im Array „ADC_TEMP_MEAN“ zwischengespeichert.

Zur Berechnung der Widerstände und den daraus resultierenden Temperaturen durchlaufen die Mittelwerte das SubVI 1.

Die Berechnung findet in der Funktion „MathScript-Knoten“ statt. Mit Hilfe dieser Funktion können Rechenalgorithmen, ähnlich wie in MATLAB, durchgeführt werden.

Zur Berechnung:

Der AD-Wandler kann Spannungen von max. -10,23V bis +10,23V auslesen er arbeitet jedoch mit einer Referenzspannungsquelle von 2,56V. Die Eingangsspannungen gelangen über einen Spannungsteiler an den Eingang des Wandlers. Die hier verwendete 16Bit Wandler-Schaltung ist für ein „quasi“ bipolares Arbeiten ausgelegt worden. Entsprechend weicht die Schaltung von der einer unipolaren Schaltung ab. Anders ausgedrückt heißt das, dass der Wandler zwischen -10,23 bis 0V mit 1,28V Referenzspannung arbeitet und von 0V bis 10,23V mit der anderen Hälfte, 1,28V-2,56V. Wir benötigen nur die positiven 10,23V Eingangsspannung; d.h., uns stehen bloß 15Bit Auflösung zur Verfügung.

$$2^{16} = 65536 \text{ ink für einen Spannungsbereich von: } -10,23\text{V} \dots +10,23\text{V} = 20,46\text{V}$$

Wir nutzen den positiven Spannungseingang von: $0\text{V} \dots +10,23\text{V} = 10,23\text{V}$

Die 65536ink entsprechen dem kleinstmöglichen Quantisierungsschritt bzw. der minimalen Spannungsdifferenz, die unterschieden werden kann. Im Folgenden werden diese Quantisierungsschritte mit ink (Inkrement) abgekürzt.

Achtung:

Die Firmware des Controllers stellt uns hier ein paar Stolpersteine in den Weg. Sie unterstützt dieses „quasi“ bipolare Arbeiten des AD-Wandlers, indem sie den Offsetfehler, beim Eingangsspannungsbereich von -10,23V...0V, eliminiert. Sie subtrahiert 32767ink vom Wandlerergebnis. Im positiven Eingangsspannungsbereich von 0V...10,23V stehen uns nur 15Bit Auflösung zur Verfügung.

Für uns bedeutet dies, dass wir effektiv nur mit einem 15Bit-Wandler arbeiten.

Formel 21

$$2^{15} = 32768 \text{ A10,23V}$$

Unsere Auflösung beträgt 65536ink, bei einer Referenzspannung von:
2,56V, bzw. 32768ink bezogen auf 1,28V.

Zur Berechnung der Werte benötigen wir nun die Spannung auf ein Quantisierungsschritt bezogen:

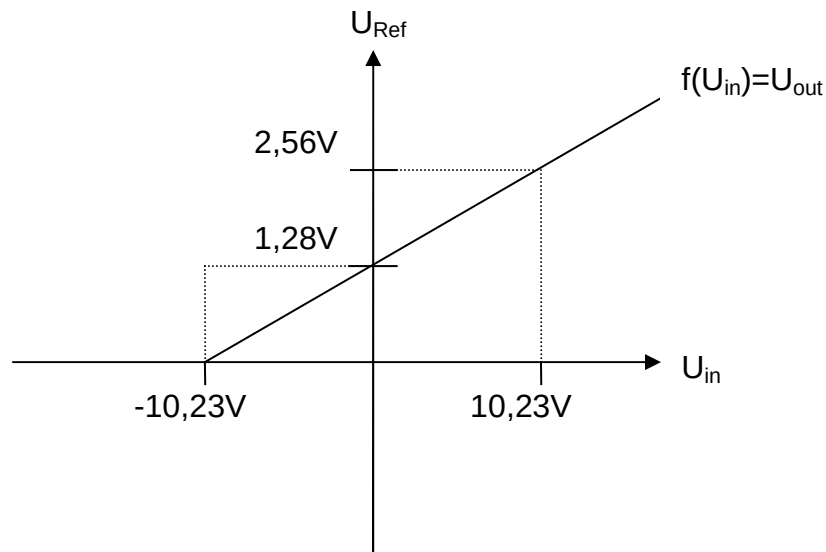
Formel 22

$$\frac{2,56V}{65535ink} = \frac{1,28V}{32767ink} = 3,906369 \cdot 10^{-5} \frac{V}{ink} = 0,03906369 \frac{mV}{ink}$$

Da die Eingangsspannung größer ist als die Referenzspannung, passiert die Eingangsspannung einen Spannungsknoten und einen hochpräzisen Spannungsteiler. Die Eingangsspannung wird durch das „quasi“ bipolare Arbeiten mit der Referenzspannung beaufschlagt.

Das Eingangssignal am Eingang des AD-Wandlers setzt sich zum einen aus der Referenzspannung und zum anderen aus dem eigentlichen Eingangssignal zusammen. Die resultierende Eingangsspannung des AD-Eingangs besteht aus zwei Spannungsquellen. Bei der Rückrechnung des anliegenden Signals müssen diese Faktoren berücksichtigt werden.

Die Überlagerung der beiden Spannungen kann durch eine lineare Funktion beschrieben werden.



Beschreibung der Superposition der Referenz- sowie der Eingangsspannung durch die Funktion $f(U_{in}) = f(U_{out})$

Die Funktion $f(U_{in}) = f(U_{out})$ entspricht einer linearen Funktion, die auf der Y-Achse nach oben verschoben wurde. $f(U_{in}) = m U_{in} + n$, mit $n = 1,28$.

$f(U_{in})$ = Spannung, die am Eingangspin des ADC anliegt

U_{in} = Spannung Eingang AD-Karte = Spannung am Ausgang PT100-Messkarte

U_{REF} = Spannung von Referenzspannungsquelle

Zur Berechnung der Funktion:

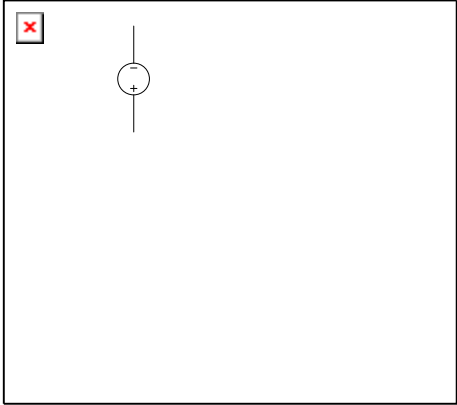
Formel 23 $f(U_{IN}) = mU_{IN} + n$ $f(U_{IN}) = 0$ $0 = mU_{IN} + n$ $U_{IN} = -\frac{n}{m}$ $-10,23 = -\frac{n}{m}$ $m = \frac{1,28}{10,23} = 0,1251$	Mit der Nullstelle $-10,23=U$ (laut Datenblatt) ergibt sich für den Anstieg der Funktion:
---	---

Formel 24

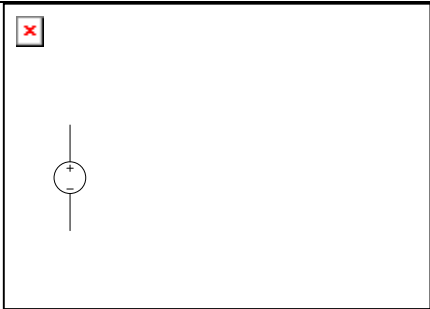
$$f(U_{IN}) = f(U_{OUT}) = 0,1215U_{IN} + 1,28$$

Aus dieser linearen Gleichung ist jeder Eingangsspannung einer Referenzspannung zugeordnet. Zur Bestimmung der Widerstandswerte bzw. der daraus resultierenden Temperaturen benötigen wir U_{in} .

Bestätigung der oben ermittelten Funktion aus dem Schaltplan der AD16-8-Karte.

	$R_{11} = 2,00k\Omega$ $R_{10} = 8,06k\Omega$ $R_6 = 2,67k\Omega$ $U_{IN} = \text{Eingangsspannung}$ $U_{REF} = \text{Referenzspannung}$ $U_{OUT} = \text{Ausgangsspannung} = AD / \text{Eingang}$
Abbildung 31: AD-Eingang der AD-Wandlerkarte	

Wie durch die lineare Funktion $f(U_{IN}) = f(U_{OUT})$ zu erkennen ist, resultiert das Ausgangssignal aus der Superposition der beiden Eingangsspannungen U_{REF} und U_{IN} .

	Zur Erleichterung der Berechnung des linearen Netzwerkes ist hier das Netzwerk vereinfacht dargestellt worden. Die Spannungsquellen U_{REF} und U_{IN} sowie die Widerstände R_{11} und R_{10} werden zu einer Spannungsquelle U_{ERS} und einem Gesamtwiderstand R_{ERS} zusammengefasst.
Abbildung 32: Vereinfachung des Netzwerkes	

Für die Bestimmung des Ersatzwiderstandes R_{ers} werden die Spannungsquellen durch Kurzschlüsse ($U=0$) ersetzt. Der Ersatzwiderstand, auch mit Innenwiderstand bezeichnet, stellt nur eine reine Rechengröße dar.

Formel 25

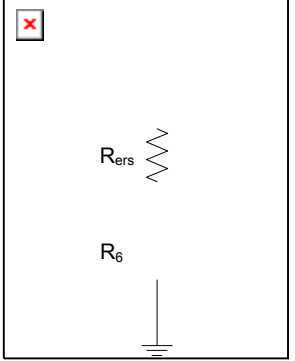
$$R_{ERS} = R_{11} \parallel R_{10} = \frac{1}{\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{10}}} = \frac{R_{11} * R_{10}}{R_{11} + R_{10}} \quad U_{REF} = U_{IN} = 0$$

		Aus der Vereinfachung des Netzwerkes kann jetzt mit Hilfe der „Überlagerungsmethode nach Helmholtz“ das lineare Netzwerk berechnet werden.
Abbildung 33: Ersatzspannungsquelle Ersatzwiderstandes	Einfügen und der des	

Die Berechnung für die Ersatzspannungsquelle nach Helmholtz.

Formel 26

$$U_{ERS} = U_{REF} * \frac{R_{10}}{R_{11} + R_{10}} + U_{IN} * \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}}$$

		Der Ersatzwiderstand und R_6 bilden einen Spannungsteiler. Formel 27 $\frac{U_{OUT}}{U_{ERS}} = \frac{R_6}{R_{ers} + R_6}$ Nach U_{OUT} umgestellt: Formel 28 $U_{OUT} = U_{ERS} * \frac{R_6}{R_{ers} + R_6}$
Abbildung 34: Spannungsteiler		

Setzen wir nun Formel 26 und Formel 25 in die Formel 28 ein, dann ergibt sich:

Formel 29

$$U_{OUT} = \left(U_{REF} * \frac{R_{10}}{R_{11} + R_{10}} + U_{IN} * \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} \right) * \frac{R_6}{\frac{R_{11} * R_{10}}{R_{11} + R_{10}} + R_6}$$

Nach Auflösen den Doppelbruches ergibt sich:

Formel 30

$$U_{OUT} = \left(U_{REF} * \frac{R_{10}}{R_{11} + R_{10}} + U_{IN} * \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} \right) * \frac{R_6 (R_{11} + R_{10})}{R_{11} * R_{10} + R_6 (R_{11} + R_{10})}$$

Durch Kürzen mit $(R_{11} + R_{10})$ ergibt sich:

Formel 31

$$U_{OUT} = (U_{REF} * R_{10} + U_{IN} * R_{11}) * \frac{R_6}{R_{11} * R_{10} + R_6 (R_{11} + R_{10})}$$

Durch Umformen in die lineare Ausgangsform: $f(U_{IN}) = mU_{IN} + n$ ergibt sich der Zusammenhang:

Formel 32

$$f(U_{IN}) = U_{OUT} = \underbrace{\frac{R_{11}R_6}{R_{11} * R_{10} + R_6 (R_{11} + R_{10})}}_{\text{Anstieg}} * U_{IN} + \underbrace{U_{REF} * \frac{R_{10}R_6}{R_{11} * R_{10} + R_6 (R_{11} + R_{10})}}_{\text{Versatz auf Y-Achse}}$$

Nach **Formel 24**

$$f(U_{IN}) = U_{OUT} = 0,1215U_{IN} + 1,28$$

ergab sich für den Anstieg ein Wert von 0,1215 und für den Versatz auf der Y-Achse ein Wert von 1,28.

Im nächsten Rechenschritt findet eine Überprüfung der theoretischen Überlegungen aus Formel 24 mit Formel 32 statt.

Formel 33

$$f(U_{IN}) = U_{OUT} = \frac{2,00k\Omega * 2,67k\Omega}{2,00k\Omega * 8,06k\Omega + 2,67k\Omega * (2,00k\Omega + 8,06k\Omega)} * U_{IN} + \dots$$
$$\dots 2,56V * \frac{8,06k\Omega * 2,67k\Omega}{2,00k\Omega * 8,06k\Omega + 2,67k\Omega * (2,00k\Omega + 8,06k\Omega)}$$

Formel 34

$$f(U_{IN}) = U_{OUT} = 0,124 * U_{IN} + 1,281V$$

Aus Formel 33 wird ersichtlich, dass unsere Überlegungen richtig waren. $f(U_{IN})$ ist die Spannung am Eingang des AD-Wandlers. Bei der Rückrechnung vom AD-Wandler zum PT-100-Messglied, die notwendig wird, damit der Widerstand sowie die Temperatur bestimmt werden können, ziehen wir wieder Formel 34 heran.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Berechnung der Widerstandswerte und im Anschluss mit der Berechnung der Temperaturen.

Zur Berechnung der Widerstandswerte:

Geg.:

Ges.:

$$R_{Pt-100}$$

$$AD - Werte = 0...32767ink$$

$$\frac{V_{REF}}{Auflösung} = \frac{2,56V}{65536ink} = 3,90625 * 10^{-5} \frac{V}{ink}$$

$$I_{Mess} = 0,001A$$

$$Verstärkung = 67,667$$

$$U_{OUT} = U_{Eingang(AD)} = 0,124 * U_{IN} + 1,281V > U_{IN} = \frac{U_{Eingang(AD)} - 1,28V}{0,124}$$

Herleitung:

Formel 35

$$U_{OUT(Pt100-Karte)} = R_{Pt100} \times I_{Mess} \times Verstärkung$$

Formel 36

$$U_{OUT(Pt100-Karte)} = U_{IN}$$

Formel 37

$$R_{Pt100} \times I_{Mess} \times \text{Verstärkung} = \frac{U_{Eingang(AD)} - 1,28V}{0,124}$$

$$R_{Pt100} = \frac{U_{Eingang(AD)} - 1,28V}{0,124 \times I_{Mess} \times \text{Verstärkung}} = (U_{Eingang(AD)} - 1,28V) \times \frac{1}{0,124 \times I_{Mess} \times \text{Verstärkung}}$$

Formel 38

$$\frac{2,56V}{65536ink} = \frac{U_{Eingang(AD)}}{32768ink + ADC_Wert}$$

$$U_{Eingang(AD)} = \frac{2,56V \times (32768ink + ADC_Wert)}{65536ink}$$

In Formel 37 eingesetzt:

Formel 39

$$R_{Pt100} = \left(\frac{2,56V \times (32768ink + ADC_Wert)}{65536ink} - 1,28V \right) \times \frac{1}{0,124 \times I_{Mess} \times \text{Verstärkung}}$$

$$R_{Pt100} = \left(\left(3,90625 \times 10^{-5} \frac{V}{ink} \times (ADC_Wert + 32768ink) \right) - 1,28V \right) \times \frac{1}{0,124 \times I_{Mess} \times \text{Verstärkung}}$$

Rechenbeispiel:

Nehmen wir an, der Instrumentenverstärker misst eine Spannungsdifferenz von 0,1385V bei einer Temperatur von 100°C.

Diese 0,1385V werden mit dem Verstärkungsfaktor des Instrumentenverstärkers multipliziert.

Formel 40

$$0,1385V \times 67,667 = 9,3718V$$

Diese 9,3718V stehen nun am Ausgang der Pt100-Karte. Am Eingang der AD16-8-Karte passieren diese 9,3718V, den Spannungsknoten sowie den Spannungsteiler vor dem Eingang des Wandlers.

Formel 41

$$U_{OUT} = U_{Eingang(AD)} = 0,124 \cdot 9,3718V + 1,28V = 2,44V$$

Die 2,44V stehen jetzt vor dem Eingang des AD-Wandlers und entsprechen 62464ink (bezogen auf 16Bit Auflösung).

Formel 42

$$\frac{2,44V}{3,90625 \cdot 10^{-5} \frac{V}{ink}} = 62464ink$$

Unter Berücksichtigung der Firmware ergibt sich für die Inkremente ein korrigierter Wert für die Berechnung der Werte, die der AD-Wandler zur Verfügung stellt.

Korrigierter Wert:

Formel 43

$$62464ink - 32768ink = 29696ink$$

Die Rückrechnung:

Bei einem ADC-Wert von 29696ink ergibt sich ein Widerstandswert von:

Formel 44

$$R_{Pt100} = \left[\frac{2,56V \times (32768ink + 29696ink)}{65536ink} - 1,28V \right] \times \frac{1}{67,667 \times 0,001A \times 0,124V}$$

$$R_{Pt100} = 138,248\Omega \left[\left(\frac{ink \times V}{ink} - V \right) \times \frac{1}{A} = \frac{V}{A} = \Omega \right]$$

Der ermittelte Widerstandswert weicht geringfügig vom vorgegebenen Widerstandswert ab, was auf Rundungsfehler sowie Toleranzen der Bauelemente zurückzuführen ist. Um diesen Fehler so gering wie möglich zu halten, wurden Bauelemente (z.B. Widerstände) mit 0,1% Toleranz verbaut.

In der Berechnung muss ein Offset von 32768ink dem Bit-Wert des AD-Registers hinzu addiert werden.

Der eigentliche Stolperstein bei der Berechnung ist, dass der Wandler mit einer Auflösung von 65536ink arbeitet und seine Werte bezogen auf 16Bit an den Controller schickt, der jedoch im negativen Spannungsbereich 32768ink abzieht. Dem Anwender stehen also zweimal 32768ink zur Verfügung. Die Unterscheidung zwischen 32768ink für den negativen und 32768ink für den positiven Spannungsbereich realisiert die Firmware und soll hier nicht betrachtet werden.

Das Problem tritt allerdings nur auf, wenn die Rohdaten des Wandlers direkt abgegriffen und verarbeitet werden.

Wichtig für uns ist der Wert des AD-Registers, mit dem wir arbeiten, für den positiven Eingangsspannungsbereich und die Tatsache, dass ein Offset bei der Rückrechnung berücksichtigt werden muss.

Mit dem errechneten Widerstandswert lässt sich im Folgenden die dem Widerstand entsprechende Temperatur berechnen.

Berechnung der Temperatur:

Die Berechnung der Temperatur erfolgte nach DIN IEC 60751.

Die allgemeine Gleichung zur Herleitung der Temperatur lautet.

Formel 45

$$R_t = R(t) = At^2 + Bt + C \quad A = -5,775 \cdot 10^{-5} \quad B = 3,9083 \cdot 10^{-1}$$

Die Temperaturkoeffizienten A und B sind aus DIN IEC 60751 zu entnehmen.

C ermittelt sich aus dem Wert 100-R, R steht für den Widerstandswert des Pt100-Messgliedes, bei der Temperatur t.

Zur Berechnung der quadratischen Gleichung:

Formel 46

$$R(t) = At^2 + Bt + C$$

$$R(t) = 0$$

$$0 = At^2 + Bt + C$$

$$0 = t^2 + \frac{B}{A}t + \frac{C}{A}$$

$$t_{1,2} = -\frac{B}{2A} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}}$$

Mit

$$A = -5,775 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega}{^\circ C}$$

$$B = 3,9083 \cdot 10^{-1} \frac{\Omega}{^\circ C^2}$$

ergibt sich:

Formel 47

$$t_{1,2} = \frac{3,9083 \cdot 10^{-1}}{2 \times (5,775 \cdot 10^{-5})} \pm \sqrt{\left(\frac{(3,9083 \cdot 10^{-1})^2}{4 \times (-5,775 \cdot 10^{-5})^2} + \frac{100 - R}{5,775 \cdot 10^{-5}} \right)}$$
$$\left[\frac{\frac{\Omega}{^\circ C} \times \frac{^\circ C^2}{\Omega} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{\Omega^2}{^\circ C^2} \times \frac{^\circ C^4}{\Omega^2} \right) - \left(\frac{\Omega}{\Omega} \times ^\circ C^2 \right) \right)} \right]$$
$$\left[^\circ C \pm \sqrt{(^{\circ}C^2 - ^{\circ}C^2)} \right]$$

Der Wert für R wurde aus vorheriger Berechnung gewonnen und wird jetzt hier eingesetzt: $R = 138,248\Omega$

Daraus ergeben sich die Nullstellen:

$$t_{1,2} = \frac{3,9083 \cdot 10^{-1}}{2 \times (5,775 \cdot 10^{-5})} \pm \sqrt{\left(\frac{(3,9083 \cdot 10^{-1})^2}{4 \times (-5,775 \cdot 10^{-5})^2} + \frac{100 - 138,248}{5,775 \cdot 10^{-5}} \right)}$$

$$t_1 = 6668,32$$

$$t_2 = 99,30$$

Gewählt: $t_2 = 99,30^\circ\text{C}$

Die Genauigkeitsklasse unseres Pt100-Messgliedes ist vom Typ:
Klasse B: $t = \pm (0,30 + 0,005 \times t)$

Somit lautet unser Ergebnis unter Berücksichtigung der Toleranz:

Formel 48

$$t = t_2 \pm (0,30 + 0,005 \times 99,30^\circ\text{C})$$

$$t = 99,30^\circ\text{C} \pm 0,15^\circ\text{C}$$

6.4.8 Die Implementierung in LabView



Abbildung 35: Berechnung der Widerstandswerte und dazugehörigen Temperaturen

Die Berechnung wurde mittels der Funktion „MathScript-Knoten“ realisiert.

Im oberen Teil der Funktion befindet sich der Definitionsteil, der aus den vorherigen Erläuterungen hervorgeht.

In der Berechnung ist die Korrektur des „quasi“ bipolaren Arbeitens Rechnung getragen worden, indem auf den Wert des AD-Registers (Eingang Array „ADC“) 32768ink hinzu addiert worden sind.

Die Formel $U_{ADC} = (ADC + 32768) \cdot D$ berechnet die Eingangsspannung vom AD-Eingang. Sie berücksichtigt den von der Firmware abgezogenen Offsetfehler von 32768ink.

Der Widerstand des Pt100-Messwiderstandes wird mit der folgenden Formel ermittelt.

$$R = (U_ADC - 1,28) / (I_MESS \times V \times 0,124)$$

Diese Formel entspricht der von uns entwickelten Gleichung (Formel 39) unter der Überschrift „Zur Berechnung der Widerstandswerte“.

Das Lösen der quadratischen Gleichung erfolgt Mittels root-Funktion.

Die Ergebnisse der Eingangsspannungen vor dem AD-Wandler, die Widerstandswerte der Pt100-Glieder sowie die dazugehörigen Temperaturen werden in den Arrays „U_ADC“, „R“ und „T“ abgelegt. Entsprechend dem Ergebnis der beiden Lösungen, wird hier die zweite Lösung ausgewählt und weiterverarbeitet.

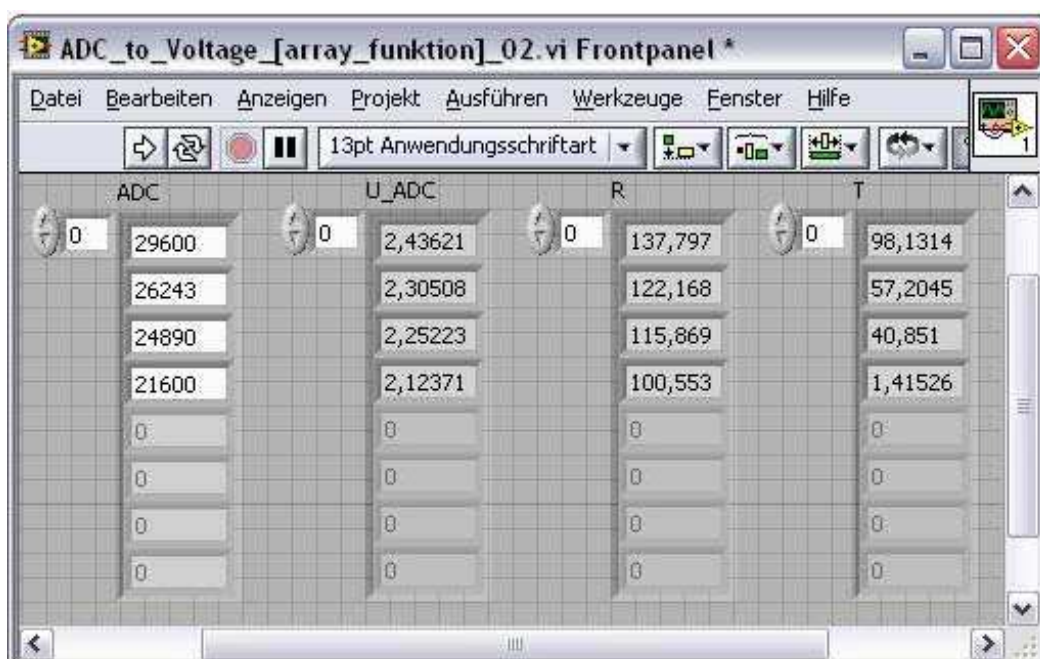


Abbildung 36: Frontpanel zur MathScript-Berechnung

Im Frontpanel zum Blockschaltbild unter Abbildung 36: Frontpanel zur MathScript-Berechnung werden die Eingangswerte des ADC, die Eingangsspannungen, Widerstandswerte sowie die Temperaturen angezeigt.

Anmerkung:

Die letzten 4 Felder des Arrays „ADC“ sind nicht initialisiert und deshalb mit Null definiert. Die Annahme, dass dieser Wert dem Temperaturbereich 0°C entspricht, ist nicht zutreffend.

Bei 0°C fallen über dem Widerstand 0,1V ab, der mit dem Verstärkungsfaktor multipliziert wird.

Formel 49

$$0^{\circ}\text{C} : R_0 = 100\Omega$$

$$100\Omega \times 0,001\text{A} = 0,1\text{V}$$

$$0,1\text{V} \times 67,667 = 6,7667\text{V}$$

Am Ausgang der Pt100-Schaltung liegen 6,7667V an.

Formel 50

$$U_{\text{Eingang(AD)}} = 0,124 * 6,7667\text{V} + 1,28\text{V} = 2,12\text{V}$$

Es liegen bei 0°C 2,12V vor dem Eingang des ADC.

Die Felder 5...8 finden in der weiteren Auswertung derzeit keine Berücksichtigung.

Unter einem anderen Gesichtspunkt betrachtet, erweitert dieses Verhalten den angestrebten Temperaturbereich von $0^{\circ}\text{C} \dots 100^{\circ}\text{C}$ auf $0^{\circ}\text{C} \dots 130^{\circ}\text{C}$. Das obere Ende des Temperaturbereiches wird durch den maximalen Eingangsspannungsbereich der AD-Karte, von 10,23V, begrenzt. Der untere Temperaturbereich wird beschränkt durch die DIN IEC 60751. Unsere benutzte Formel beinhaltet den Temperaturbereich 0...100°C. Für Temperaturen kleiner 0°C verwendet man e in Polynom 4. Grades. Da wir ausschließlich im positiven Temperaturbereich arbeiten, ist diese Rechnung nicht nötig.

Fazit:

Der geforderte Temperaturbereich von $0^{\circ}\text{C} \dots 100^{\circ}\text{C}$ kann mit Sicherheiten nach oben gewährleistet werden. Flüssigkeiten in geschlossenen Systemen, wie z.B. Kühlwasserkreislauf eines PKW, können Temperaturen $>100^{\circ}\text{C}$ annehmen. Dies ist

bei einer PC-Wasserkühlung nicht der Fall. Temperaturen um 65°C sind bei derartigen Wasserkühlungen schon der Höchstwert.

6.4.9 Anzeige der PT-100-Temperaturwerte

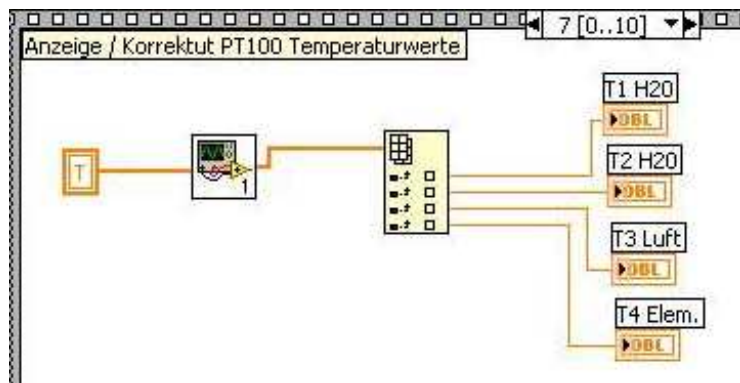


Abbildung 37: Anzeige der Temperaturwerte

Die Anzeige der Temperaturwerte erfolgt im Sequenzrahmen 7. Die berechneten Werte gelangen in das SubVI 1. Am Ausgang dieses VI werden die kalibrierten Werte vereinzelt und ausgegeben.

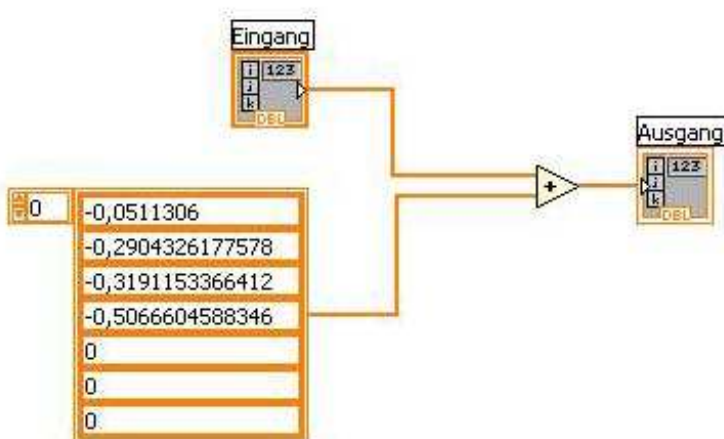


Abbildung 38: Korrektur der Temperaturwerte

In Abbildung 38: Korrektur der Temperaturwerte sehen wir das Eingangsarray „Eingang“, welches die berechneten Temperaturwerte beinhaltet. Die Konstanten, unten links im Bild, enthalten das Temperatur-Offset der vier verwendeten Pt100-Messwiderstände.

Die Ermittlung des Offsetfehlers erfolgte mittels Thermogefäß mit Eiswasser. Dieses Eiswasser hat eine Temperatur von 0°C, zumindest in sehr guter Näherung. Die Temperaturen der Pt100-Messwiderstände wurden mittels Auswertung von LabView gemessen und gemittelt. Die gemittelten Werte wurden vom Referenzwert subtrahiert

und als Konstanten abgelegt. Die hinterlegten Konstanten beinhalten das Temperatur-Offset der Pt-100-Widerstände zu 0°C.

6.4.10 Ermittlung der Differenztemperaturen

Der letzte Rahmen für die Abarbeitung der gewünschten Funktionalität bearbeitet die im Bedienfrontpanel angezeigten Differenztemperaturen.

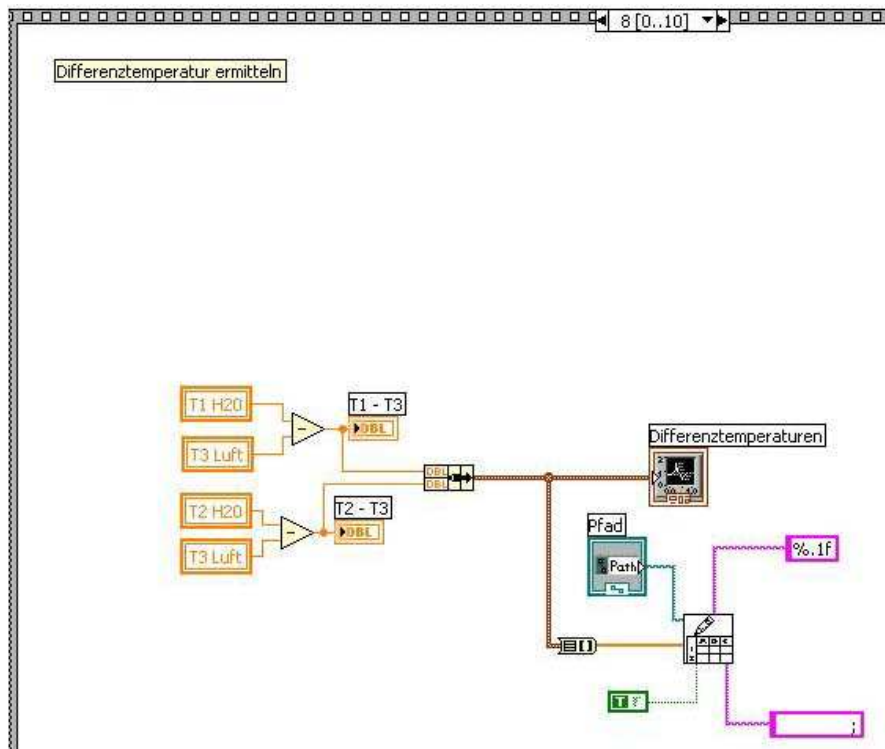


Abbildung 39: Rahmen 8 der Sequenzstruktur, Ermittlung der Differenztemperaturen

Die berechneten Eingangswerte stehen in den Variablen „T1 H2O“, „T2 H2O“ sowie „T3 Luft“ zur Verfügung. T1 repräsentiert dabei die Temperatur eingangsseitig des Prüfstandes, T2 die Temperatur ausgangsseitig und T3 die Umgebungstemperatur.

Die Temperatur T3 wird von T1 abgezogen und in eine Variable („T1-T3“) geschrieben. Für T2 verläuft diese Berechnung mit demselben Muster.

Die Variablen „T1-T3“ sowie „T2-T3“ werden zu einem Array zusammengeführt und dem Diagramm „Differenztemperaturen“ zur Verfügung gestellt.

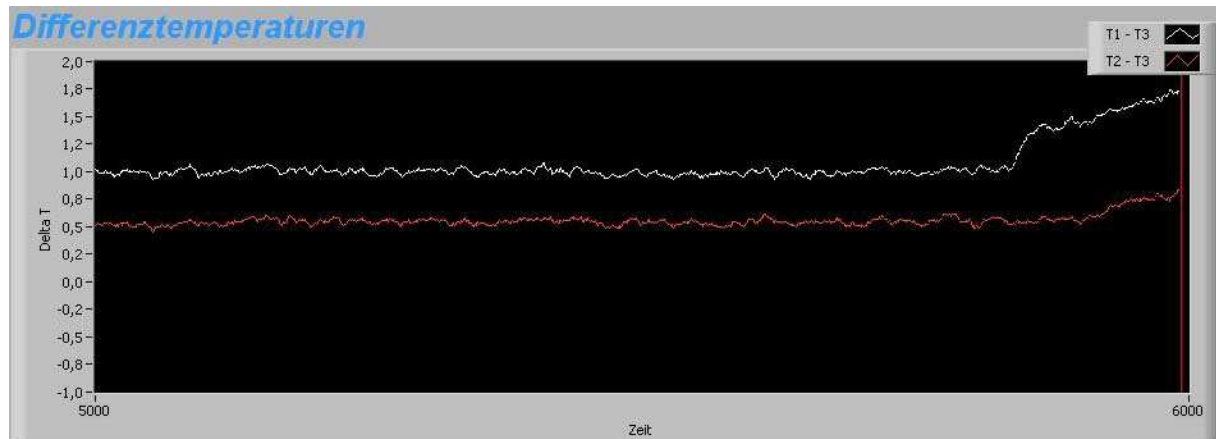


Abbildung 40: Ausschnitt Frontpanel, Anzeige der Differenztemperaturen

Die Achseneinteilung ist variabel gehalten worden, sodass sich die Achsen variabel auf die sich einstellenden Differenztemperaturen (y-Achse) sowie der Laufzeit des Programms (x-Achse) anpassen (siehe Abbildung 41: Dynamische Achseinteilung).

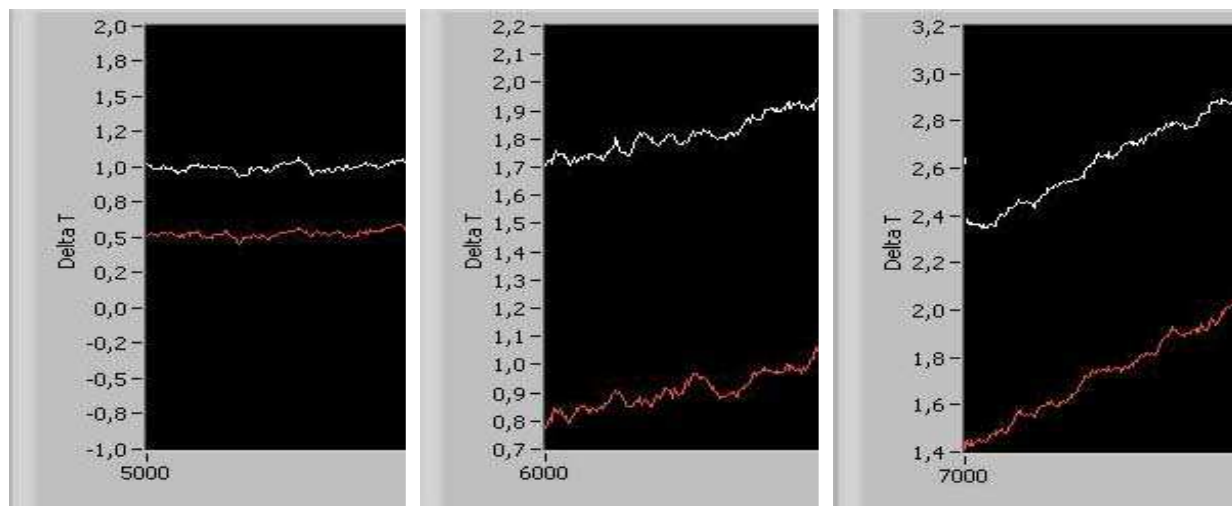


Abbildung 41: Dynamische Achseinteilung

7 Aufbau des Prüfstandes

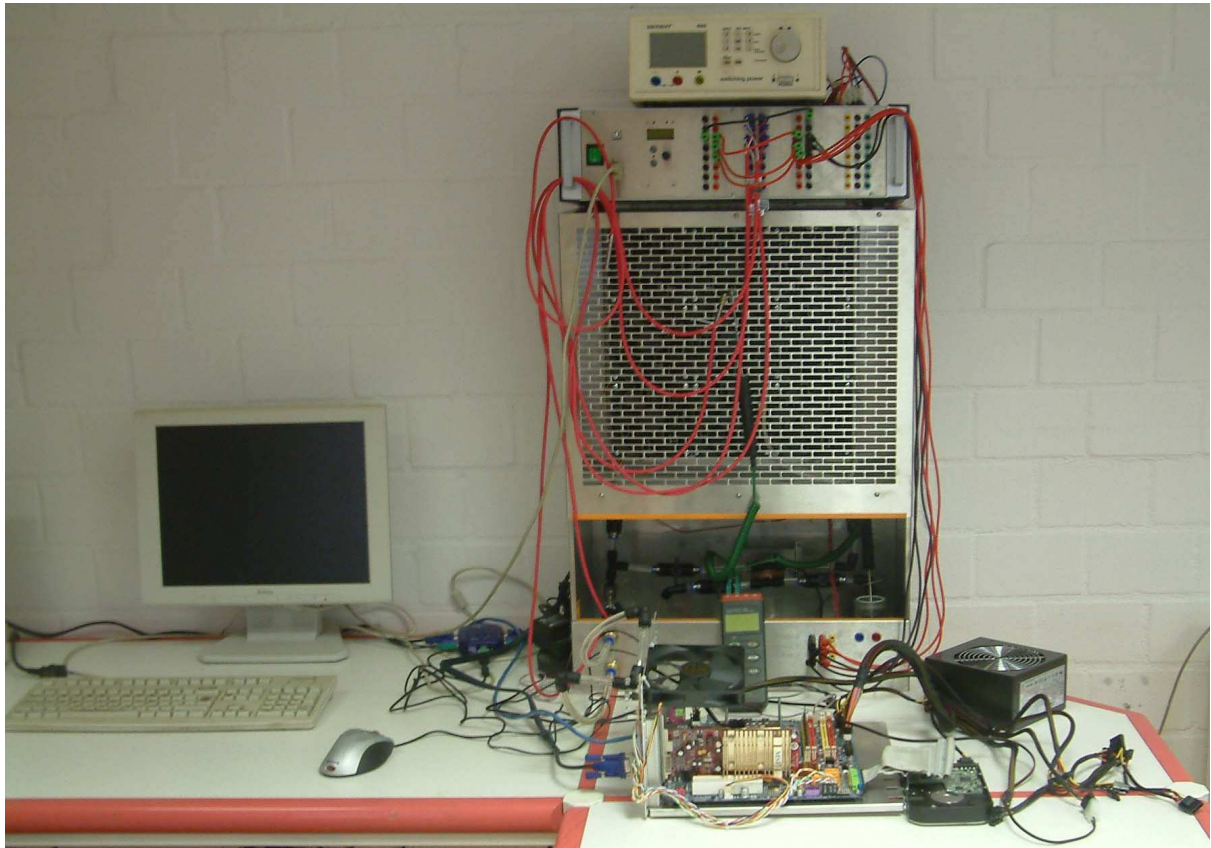


Abbildung 42: Aufbau Prüfstand

In Abbildung 42: Aufbau Prüfstand ist der voll aufgebaute Arbeitsplatz mit Prüfstand zu sehen.

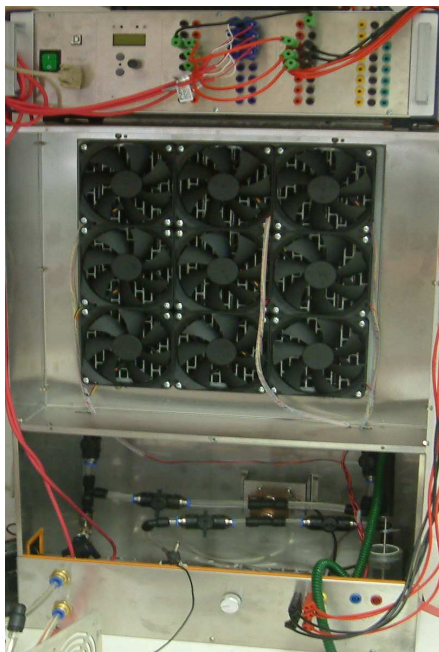


Abbildung 43: Prüfstand

← Im oberen Teil ist das Messsystem untergebracht. Von hier aus erfolgen die Ansteuerung der Lüfter, das Auslesen der Messdaten sowie der Datentransfer an den Rechner.

← Im mittleren Teil ist der Radiator mit den 3 Lüftereinheiten eingebaut.

← Die Pumpe, ein Heizelement, der variable Flüssigkeitskreislauf sowie der Eintritt/Austritt der Kühlflüssigkeit befinden sich im unteren Teil.

7.1 Das Messsystem

ON/OFF Panel ADC Pt-100 Fan-Treiber IO32
Dataoutput

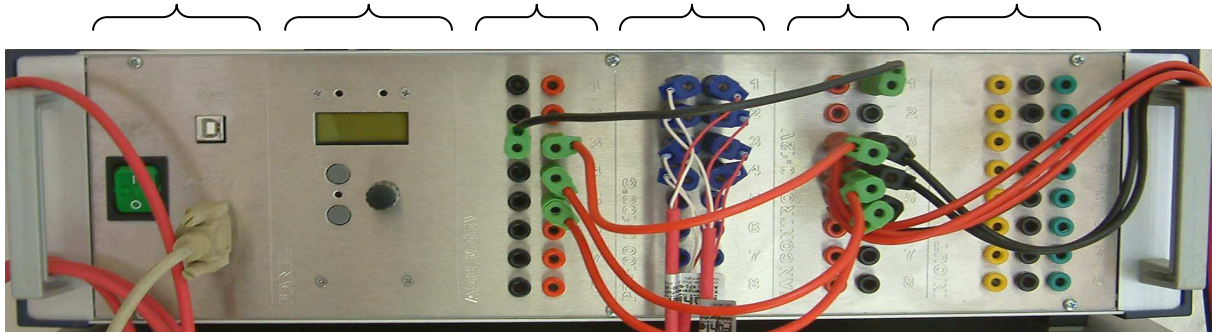


Abbildung 44: Messsystem Frontansicht

Das Messsystem unterteilt sich optisch in 6. Module.

ON/OFF, Dataoutput:

Das erste Modul weist 2 Funktionalitäten auf. Zum einen den An/Aus-Schalter und zum anderen die zwei Schnittstellen zum PC. Der Schalter ist gekoppelt mit der IFP-Platine (Spannungsversorgung der Module) sowie mit dem Netzteil für die FAN-Treiberplatine. Bei den Schnittstellen ist derzeitig nur die serielle Schnittstelle implementiert. Der USB-B Anschluss ist als Erweiterung vorgesehen und könnte bei einem weiteren Ausbau des Systems mit eingebunden werden.

Hinter dem ersten Modul verbirgt sich die ADA-IO-Karte mit der ADC, IO8-32 und DAC-Karte.

Panel:

Das Bedienpanel ermöglicht den Zugriff auf die Kanäle der ADC und DAC-Karte. Bei der ADC-Platine können allerdings nur die gemessenen Spannungen angezeigt werden, wohingegen bei der DAC nur die Spannungen bis 10V eingestellt werden können, Dies jedoch nicht den Spannungen entspricht, mit denen die Lüftereinheiten angesprochen werden. Eine Erhöhung bzw. Verringerung der Lüfterdrehzahl ist dennoch möglich, wenn auch nicht exakte Vorgaben möglich sind.

ADC:

Das ADC-Modul ist mit 2x8 4mm Messsystembuchsen (Bananenbuchsen) ausgestattet. Sie sind mit dem internen 10Bit ADC des Controllers der ADA-IO-Platine verbunden. Sie ermöglichen eine schnelle Auswertung analoger Spannungen wie hier z.B. das Auslesen der Lüfterspannungen.

Die schwarzen Anschlüsse repräsentieren Masse und die roten die auszulesende Spannung.

PT-100-Messschaltung:

Bei dem Pt-100-Modul sind wie bei dem ADC-Modul die Anschlüsse platinenseitig zur besseren Verwendung nach außen verlegt worden. Es können bis zu 8 Pt100-Messwiderstände angeschlossen und durch LabView ausgewertet werden. Die Verbindungen befinden sich intern und sind so kurz wie möglich gehalten worden, damit keine unnötigen Spannungsverluste entstehen.

Fan-Treiber:

Das Lüfter-Treiber-Modul wird intern durch die DAC-Karte angesteuert und verstärkt die Spannung mit dem Verstärkungsfaktor 1,47, damit eine volle Ansteuerung der Lüfter garantiert werden kann. Es können bis zu 8 Lüfter angesteuert werden. In unserem Fall werden drei Reihen mit jeweils 3 parallel angeschlossenen Lüftern angesteuert.

IO8-32:

Das IO8-32-Modul wird derzeit nicht verwendet. Es soll primär als optionale Erweiterung für eine spätere Tastenanbindung (z.B. Test-Start, Datenaufzeichnung, Test-Stopp) verwendet werden.

7.2 Die Radiator/Lüftereinheit



Abbildung 45: Wärmetauscher mit den 3 Lüftereinheiten

Die hier verwendete Kühleinheit, bestehend aus Radiator mit 9 Lüftern, ist die Leistungsstärkste Kombination aus dem Sortiment der Firma Watercool.

Der Durchflusswiderstand eines Radiators nimmt eine entscheidende Rolle im Gesamtsystem der Wasserkühlung ein.

Gründe dafür sind die Rohrlängen und Umlenkungen der Rohre. Diese Radiatoren sind auf die speziellen Gegebenheiten einer Wasserkühlung mit geringem Durchfluss ausgelegt, und nach Vorgaben von Watercool gefertigt worden. Sie enthalten, besonders im Durchmesser, größere Rohleitungen als handelsübliche Produkte.

7.3 Der Flüssigkeitskreislauf

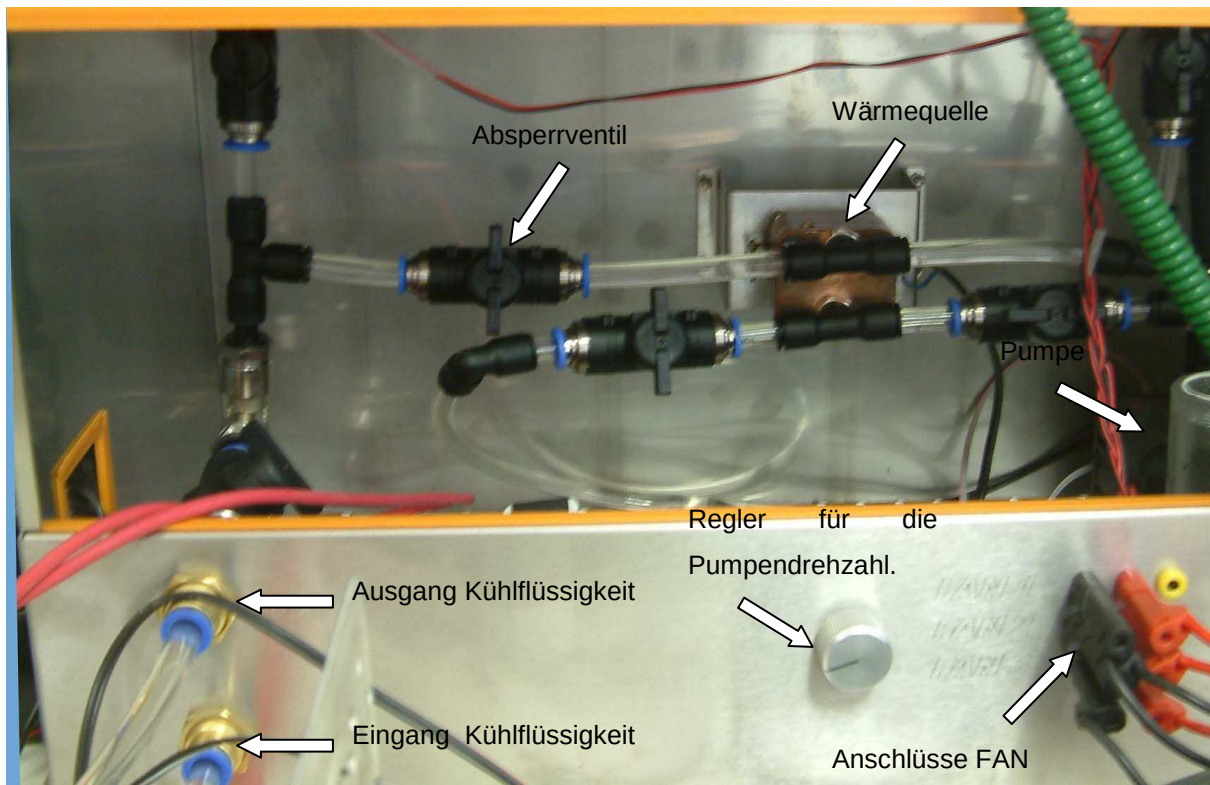


Abbildung 46: Flüssigkeitskreislauf des Prüfstandes

Der Flüssigkeitskreislauf ist unter der Überschrift 7.4 Hydraulikschaltplan des Prüfstandes näher erläutert.

Im Bild Abbildung 46: Flüssigkeitskreislauf des Prüfstandes sind die verstellbaren Ventile, der Heizer, die Wasserpumpe (rechts unten), der Eingang/Ausgang der Kühlflüssigkeit (links unten) sowie die Anschlüsse der 3 Lüftereinheiten zu sehen (rechts unten).

Der Hydraulikschaltplan zeichnet sich durch seine Übersichtlichkeit und einfache Bedienbarkeit aus. Die Absperrventile ermöglichen eine schnelle Änderung des Flüssigkeitskreislaufes, um externe Komponenten anzuschließen und testen zu können. Bei Bedarf könnte der Hydraulikschaltplan schnell abgeändert oder ausgetauscht werden.

Der zusätzliche Heizer im System erhöht die Kühlwassertemperatur. Damit sind Tests an extern angeschlossene Radiatoren möglich.

7.4 Hydraulischaltplan des Prüfstandes

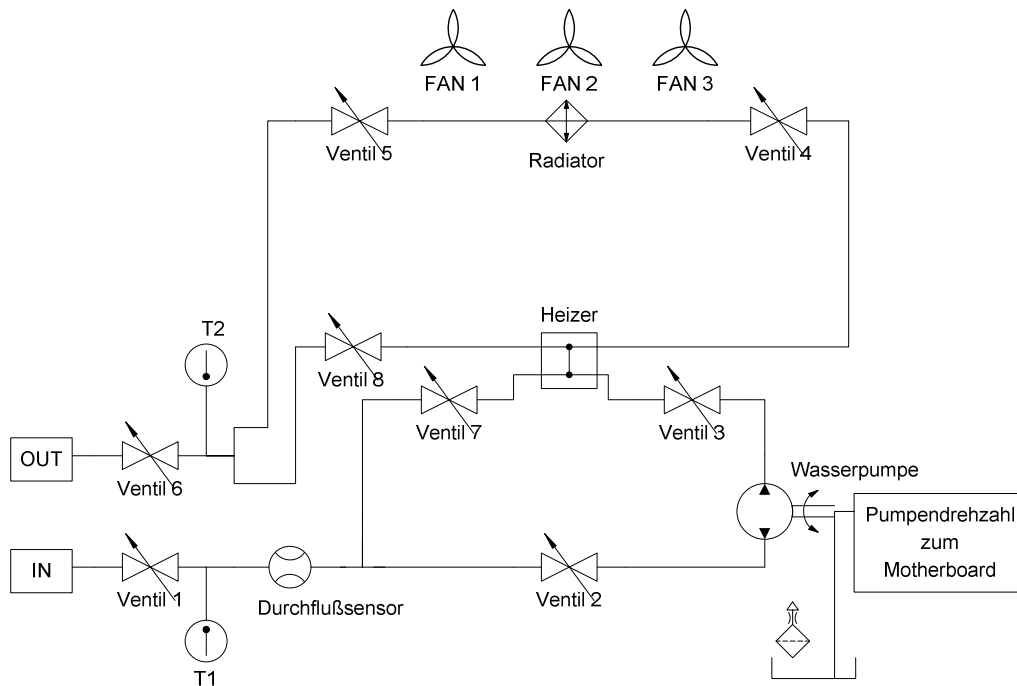


Abbildung 47: Hydraulischaltplan Prüfstand

7.5 Der Aufbau des Hydraulischaltplanes

Der Flüssigkeitskreislauf besteht aus 8 Einzelkomponenten:

- Eingang/Ausgang der Kühlflüssigkeit (IN / OUT)
- 8 Absperrventilen
- 2 Temperatursensoren
- Durchflusssensor
- Wasserpumpe mit Ausgleichsbehälter
- Heizelement
- Radiator
- 3 Lüftereinheiten

Die interne Wasserpumpe wird über ein extern angeschlossenes Mainboard in Verbindung mit einer von Watercool entwickelten Steuerelektronik angesteuert. Die Pumpe läuft nur an, wenn sie ein entsprechendes Signal vom Mainboard bekommt.

Die Pumpe ist mit einem 3pol. Stecker mit dem Motherboard verbunden (12V, Tachosignal (5V), GND). Beim Einschalten der Pumpe überprüft die Steuerelektronik, ob 12V anliegen (Mainboard angeschlossen) ist dies der Fall arbeitet die Pumpe und liefert über die 5V-Leitung ein Tachosignal an das Mainboard zurück. Ist jedoch das Motherboard nicht angeschlossen, und somit die 12V-Leitung nicht Spannungsführend, dann geht die Pumpe in einen Entlüftungsmodus. Sie schaltet sich ein und aus.

In der Regel werden jedoch, neben externen Komponententests (Radiatoren, Lüfter, Pumpen), Kühlelemente wie z.B. für CPU, GPU, RAM, Festplatten getestet. Diese Kühlelemente befinden sich meist direkt auf dem entsprechenden Chip und werden nur benötigt, wenn das Mainboard eingeschaltet wird.

Die Wasserpumpe wird im Einsatzort (Rechnergehäuse) mit einem geschlossenen Ausgleichbehälter verbaut. Hier im Prüfstand ist dies wenig sinnvoll auf Grund der ständigen Anbindung neuer Komponenten. Bei jedem Umbau entweicht Wasser aus dem System, welches wieder nachgefüllt werden muss. Aus diesem Grund wird im Prüfstand selber kein geschlossener Ausgleichsbehälter verwendet, sondern ein offener. Entsprechend wurde auch die Hydraulikschaltung mit einem belüfteten Ausgleichsbehälter versehen.

Die Ventile sind als Absperrventile verbaut worden. Die Ventile sind vor dem eigentlichen Prüfversuch in die entsprechende Position laut Tabelle 1: Ventilstellung beim Test verschiedener Komponenten zu stellen, damit Überhitzungen der Wärmequellen oder eine falsche Flussrichtung ausgeschlossen werden können.

Der Durchflusssensors dient der Überprüfung des Durchflusses einer externen Pumpe bzw. zeigt er Schwachstellen neuer Kühlkörper oder neuer Komponenten in Bezug auf die Strömungsverhältnisse im angeschlossenen Kühlkreislauf auf.

Die Temperatursensoren befinden sich am Eingang und am Ausgang der Kühlflüssigkeit im Prüfstand. Sie sind über Adapter in den Kreislauf eingebunden und stehen mit dem Wärmetransportmedium Wasser in direkter Verbindung. Der 3.

Temperatursensor ist nicht im Hydraulikschaltplan aufgeführt; seine Lage befindet sich seitlich des Prüfstandes. Er misst die Umgebungstemperatur.

V1...V8 Ventile; O = geöffnet; X = geschlossen
CPU i.A. externe Wärmequelle
HTF-Fusion Kombination mehrerer externer Komponenten

Tabelle 1: Ventilstellung beim Test verschiedener Komponenten

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
CPU	O	O	O	O	O	O	X	X
Fusion	O	X	O	X	X	O	O	X
Pumpe	O	O	X	O	O	O	O	X
Radiator	O	O	O	X	X	O	X	O

7.6 Test einer externen CPU

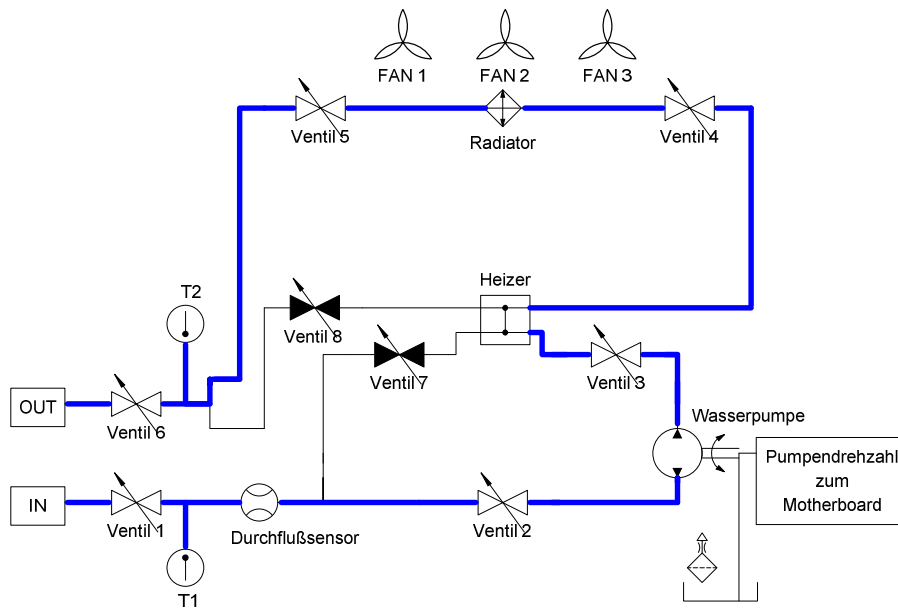


Abbildung 48: Flussschaltplan bei Anschluss einer externen Wärmequelle (CPU, RAM, GPU)

Beim Test einer externen CPU oder anderen Wärmequelle geht es primär um den Abtransport der entstandenen Verlustwärme von den Probanden. Das Wärmetransportmittel ist Wasser, welches die Wärme im Kühlkörper aufnimmt, über die Schlauchleitungen transportiert und in der Radiator/Lüftereinheit abgibt.



Abbildung 49: CPU-Kühler für Pentium 4



Abbildung 50: GPU-Kühler mit RAM und Spannungswandlerkühler

Das erwärmte Kühlwasser gelangt durch den Eingang (IN) in den Prüfstand. Es passiert über V1 den Temperatursensor T2. Im weiteren Verlauf gelangt das Wasser durch die Wasserpumpe über den nicht aktivierten Heizer zum Radiator und im Anschluss wieder zurück zum Ausgang (OUT). Hier wird der zweite

Radiator-Lüfter-Einheit gemessen (eine Messung ist prinzipiell im gesamten System möglich). Eine aktive Beeinflussung der Systemparameter wäre lediglich durch das Zuschalten des Heizers oder der integrierten Radiator/Lüfter-Kombination möglich. Die gemessene Temperatur kann je nach externer Anbindung (IN/OUT) im Testsystem entnommen werden. Eine weitere Optimierung wäre die Anbindung weiterer Pt100-Messwiderstände, die an markanten Punkten (nach Wärmequellen) in das Testsystem integriert werden.

7.8 Test einer externen Pumpe

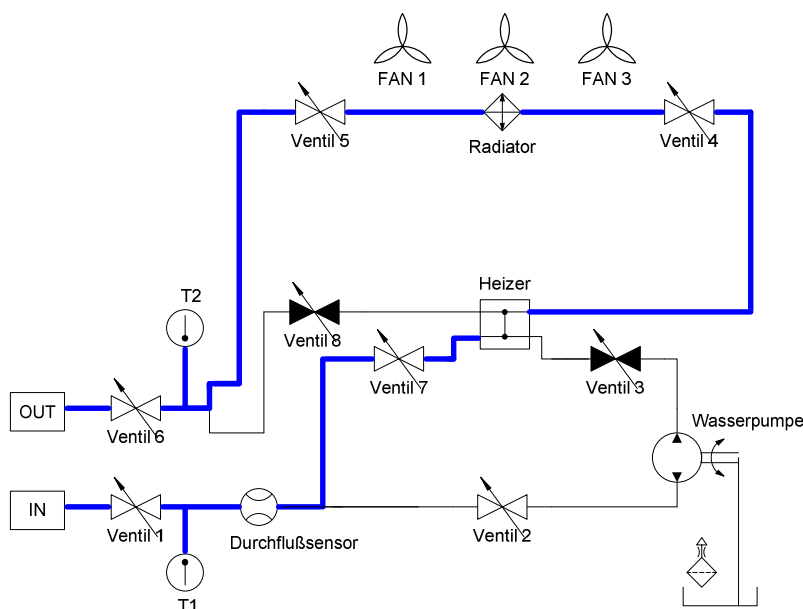


Abbildung 52: Flussschaltplan bei Anschluss einer externen Wasserpumpe

Der Test einer externen Wasserpumpe gestaltet sich recht einfach. In Abbildung 52: Flussschaltplan bei Anschluss einer externen Wasserpumpe ist der Verlauf der Kühlflüssigkeit dargestellt.

Die externe Pumpe kann durch ein vorhandenes Steuersignal eines Mainboards oder durch ein entsprechendes Netzteil betrieben werden.

Bei diesem Test wird in erster Linie der Durchfluss der Flüssigkeit durch das Prüfstandsystem oder eines angeschlossenen externen Systems gemessen. Es kommt jedoch auch bei neuen Zukaufprodukten zu Langzeittests.

7.9 Test eines externen Radiators

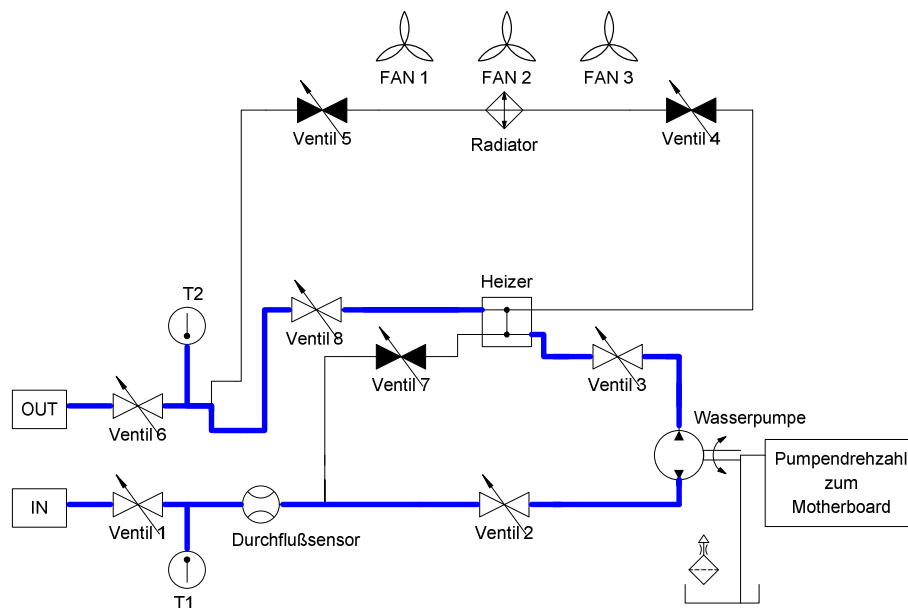


Abbildung 53: Flussschaltplan bei Anschluss eines externen Wärmetauschers

Die in der PC Wasserkühlung verwendeten Radiatoren werden speziell für diesen Einsatzzweck entworfen. Diese sind auf die Durchflussgeschwindigkeit des Kühlmediums Wasser in Verbindung mit den niedrigen Durchsatzgeschwindigkeiten der PC-Lüfter abgestimmt.

Die gängigste Radiatorlänge liegt bei kurz über 120mm, was den Einbau in einen Standart PC ermöglicht und die Verwendung eines 120mm Lüfters erlaubt. Je nach Anzahl der für den Radiator benötigten Lüfter heißen sie Single-, Dual- oder Tripple-Radiator.

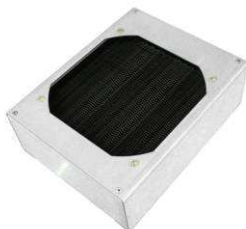


Abbildung 54: Single-Radiator

Abbildung 55: Dual-Radiator

Abbildung 56: Tripple-Radiator

Bei dem Test eines externen Radiators wird der Radiator im Prüfstand umgangen. Dies wird erreicht, indem die Ventile 4, 5 und 7 geschlossen werden.

Im Einzeltestverfahren bzw. der Kombination der Komponenten externer Radiatoren mit einer Lüftereinheit wird der im Prüfstand integrierte Heizer manuell aktiviert. T2 zeigt in diesem Fall die Temperatur in den Radiator und T1 die abgekühlte Temperatur aus dem Radiator an.

8 Ausblick

Das Ergebnis dieser Diplomarbeit ist ein rechnerunterstützter Prüfstand für den Test von PC-Wasserkühlungen. Es können Einzelkomponenten sowie Gesamtsysteme erprobt werden.

Das Messsystem erfüllt alle geforderten Aufgaben.

Die Bedienoberfläche ist Benutzerfreundlich gestaltet sowie funktional gehalten worden.

Erweiterungen bezüglich der Software wäre die Anbindung einer Test-Start sowie Test-Stopp-Funktion, über ein am Prüfstand angebrachten Kippschalter. Er würde, in Verbindung mit einer in Zeitabständen verbundenen Speicherung der Messdaten, einen noch größeren Automatisierungsschritt mit sich bringen.

Darüber hinaus wäre zu überlegen, ob und wie eine Erstellung der Messdaten in die Form eines Protokolls mit LabView zu realisieren ist.

Die nächste Software-Entwicklungsstufe wäre einen voll automatisierter Prüfablauf. Der Prüfer würde dann die zu testenden Komponenten oder Systeme anschließen, die Parameter wie z.B. „Test externer Radiator“ anklicken und 30min später ein Protokoll ausgedruckt bekommen.

Ein weiteres Feature wäre die Implementierung des Heizers sowie die Drehzahlregelung der Wasserpumpe in die LabView-Umgebung.

Die Regelung des Heizelementes müsste mit einem Regelalgorithmus versehen werden, damit es möglich wird, eine voreingestellte Wassertemperatur am Ausgang des Heizers einstellen zu können.

Die Anbindung der Pumpendrehzahl an das Messsystem birgt den Vorteil in sich, dass das Optimum von Geräuschemmission und Durchfluss schneller gefunden bzw. durch die Vorgabe von Grenzwerten (max. Differenztemperatur) automatisiert werden könnte. In diesem Zusammenhang wäre es von Vorteil den Durchflusssensor

ebenfalls in das Messsystem zu implementieren.

Die folgenden Parameter müssten dann mit in die Bedienoberfläche eingebunden werden:

- Spannungsansteuerung der Pumpe Heizelement, Drehzahl
- Durchflussmenge Durchflusssensor
- Spannungsansteuerung des Heizers, Wassertemperatur nach dem Heizer

Verwendete Bücher:

- Bernd Föste, Stefan Öing: EMV-Design Richtlinien.-Poing: Franzí's Verlag GmbH, 2003
- Jamal, Rahman; Hagestedt, Andre: LabVIEW Das Grundlagenbuch. - 4. Aufl. – München: Addison-Wesley, 2004
- Beuth, Klaus; Schmusch, Wolfgang: Grundsaltungen, Elektronik 3. – 12. Aufl. – Würzburg: Vogel, 1994
- Zander, Horst: Datenwandler, A/D- und D/A-Wandler-Schnittstellen der digitalen Signalverarbeitung. – 2. Aufl. – Würzburg: Vogel, 1990
- Kaltner Satz & Litho GmbH: PC & Elektronik, Band 1 & 2, Professionelle Schaltungstechnik. Poing: Franzí's Verlag, 2003
- Journalmedia: PC & Elektronik, Band 3 & 4, Professionelle Schaltungstechnik. Poing: Franzí's Verlag GmbH, 2003
- Journalmedia: PC & Elektronik, Band 9 & 10, Professionelle Schaltungstechnik. Poing: Franzí's Verlag GmbH, 2003
- Trampert, Wolfgang: AVR-RISC Mikrokontroller. Poing: Franzí's Verlag GmbH, 2000
- Kainka, B.; Häßler, M; Straub, H.W: Grundwissen Elektrotechnik, Analogtechnik, Digitaltechnik. Poing: Franzí's Verlag GmbH, 2004
- Schmitt, Günter: Mikrocomputertechnik mit Controllern der Atmel AVR-RISC-Familie. – 3. Aufl. – München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2007
- Eckel, Rainer; Pütgens, Leonhard; Walter, Jürgen: A/D- und D/A-Wandler, Grundlagen, Prinzipsaltungen und Applikationen. – 2. Aufl. – München: Franzí's Verlag GmbH, 1990
- Hiller, Hartmut: Operationsverstärker-Schaltungen und Anwendungen. – 1. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1982

Internetadressen:

- Meyer, C: Leistungsschau, c't-Lab: PC-Interface und Stromversorgung <<http://www.heise.de/ct/07/10/130/>>
- Meyer, C: Modulbaukasten, Projekt c't-Lab: A/D-, D/A- und Port-Motherboard ADA-IO <<http://www.heise.de/ct/07/11/212/>>
- Meyer, C: Komplementäres Paar, Projekt c't-Lab: A/D- und D/A-Wandler für Port-Modul ADA-IO <<http://www.heise.de/ct/07/13/202/>>
- Meyer, C: Schalt und Waltstelle, Projekt c't-Lab: Bedienpanel und Stromversorgung <<http://www.heise.de/ct/07/16/176/>>
- Meyer, C: Kleinkraftwerk, c't-Lab: Programmierbares Netzteil <<http://www.heise.de/ct/07/19/212/>>

Applikations- Note

- Operationsverstärker L272M; Hersteller: SGS-THOMSEN MICROELEKTRONICS < <http://www.st.com/stonline/>>
- Operationsverstärker OP07; Hersteller: ANALOG DEVICES <<http://www.analog.com/>>
- Operationsverstärker INA 163AU; Hersteller: Texas Instruments <<http://www.ti.com/>>
- Referenzspannungsquelle LT1019; Hersteller: LINEAR TECHNOLOGY <<http://www.linear.com/>>

9 Anhang:

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Enrico Tóth

Mittweida, 29.01.2009