



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Ina Herrmann

Energiecampus Hamburg: Entwicklung und  
Umsetzung eines Mess-, Steuerungs- und  
Regelungskonzeptes für den Versuchsstand  
einer intelligenten Wärmeübergabestation

Ina Herrmann

Energiecampus Hamburg: Entwicklung und  
Umsetzung eines Mess-, Steuerungs- und  
Regelungskonzeptes für den Versuchsstand einer  
intelligenten Wärmeübergabestation

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Umwelttechnik  
an der Fakultät Life Sciences  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Franz Schubert  
Zweitgutachter : M.Eng. Peter Lorenzen

Abgegeben am 21. März 2016

**Ina Herrmann**

**Thema der Bachelorthesis**

Energiecampus Hamburg: Entwicklung und Umsetzung eines Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzeptes für den Versuchsstand einer intelligenten Wärmeübergabestation

**Stichworte**

Speicherprogrammierbare Steuerung, Wärmeübergabestation, Power-to-Heat, PID-Regler

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung eines Konzeptes mit dem die Messtechnik sowie die Steuerungs- und Regelungstechnik eines Versuchsstandes umgesetzt werden kann. Der Versuchsstand soll für den Test einer intelligenten Wärmeübergabestation genutzt werden können. Das Konzept wird umgesetzt und im Anschluss auf seine Eignung geprüft. Außerdem wird überprüft, ob eine Inbetriebnahme grundsätzlich mit der bestehenden Anlage möglich ist.

**Ina Herrmann**

**Title of the paper**

The development and implementation of a concept for measuring, controlling and adjusting the test stand of a smart heat transfer station

**Keywords**

programmable logic controller, heat transfer station, Power-to-Heat, PID controller

**Abstract**

This thesis describes the development of an implementation concept for technology to measure, control and adjust a test stand. The test stand should be able to be used for a smart heat transfer station. The concept is implemented and subsequently tested for its suitability. An additional test is carried out to check whether implementation using the existing construction is possible.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Professor Franz Schubert und Herrn Peter Lorenzen für die Unterstützung und Betreuung bei der Bachelorarbeit bedanken. Außerdem danke ich dem gesamten C4DSI Team für die dauerhafte Bereitschaft mir bei Fragen zur Seite zu stehen.

Mein Dank geht ebenfalls an alle, die nach der Nennung des Titels noch die Geduld hatten weiter zuzuhören und mir jeder Zeit moralischen als auch wissenschaftlichen Beistand geleistet haben. Ich danke vor allem Flo und Carina, aber auch meiner WG, die keine Mühen gescheut hat, um mir immer wieder neue Motivation zu geben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>14</b>
1.1. Motivation . . . . .	14
1.2. Aufgabenstellung . . . . .	14
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	15
1.4. Vorarbeiten . . . . .	16
<b>2. Grundlagen</b>	<b>21</b>
2.1. Wärmetechnik . . . . .	21
2.2. Messtechnik . . . . .	25
2.3. Speicherprogrammierbare Steuerung . . . . .	28
2.4. Regelungstechnik . . . . .	31
<b>3. Hardwarekonzept</b>	<b>35</b>
3.1. Methodik . . . . .	35
3.2. Anbindung Wärmemengenzähler . . . . .	36
3.3. Anbindung Temperatursensoren . . . . .	37
3.4. Erzeuger . . . . .	40
3.5. Wärmeübergabestation . . . . .	42
3.6. Rückkühlung . . . . .	43
3.7. Gesamtkonzept . . . . .	44
<b>4. Steuerungs- und Regelungskonzept</b>	<b>46</b>
4.1. Methodik . . . . .	46
4.2. Power-for-Home-Anlage . . . . .	47
4.3. Erzeuger . . . . .	49
4.4. Wärmeübergabestation . . . . .	50
4.5. Rückkühlung . . . . .	51

---

<b>5. Umsetzung des Hardwarekonzeptes</b>	<b>54</b>
5.1. SPS . . . . .	54
5.2. Wärmemengenzähler . . . . .	57
5.3. Temperatursensoren . . . . .	59
5.4. Drucksensoren . . . . .	65
5.5. Heizlüfter . . . . .	67
5.6. Pumpe . . . . .	70
5.7. Stellantrieb . . . . .	71
<b>6. Umsetzung des Steuerungs- und Regelungkonzeptes</b>	<b>74</b>
6.1. WÜST . . . . .	77
6.2. Rückkühlung . . . . .	78
6.3. Erzeuger . . . . .	86
<b>7. Validierung und Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>91</b>
7.1. Temperaturen . . . . .	91
7.2. Drücke . . . . .	92
7.3. Elektrische Last . . . . .	94
7.4. Elektrische Last mit vorgegebenem Vorlauftemperaturprofil . . . . .	95
7.5. Thermische Last . . . . .	97
7.6. Thermische Last mit vorgegebenem Rücklauftemperaturprofil . . . . .	100
7.7. Testbetrieb Wärmeübergabestation . . . . .	103
7.8. Fazit . . . . .	103
<b>8. Zusammenfassung</b>	<b>109</b>
<b>9. Ausblick</b>	<b>111</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>116</b>

# Tabellenverzeichnis

1.1. Leistungsbeschreibung des Versuchsstandes . . . . .	19
1.2. Leistungsbeschreibung des Versuchsstandes . . . . .	20
2.1. Aufbau einer Hardwareadresse nach IEC61131-3 . . . . .	30
2.2. Darstellungsform einfacher Übertragungsglieder . . . . .	32
3.1. Ein- und Ausgangssignale der Komponenten des Erzeugers . . . . .	41
3.2. Hardware für den Erzeuger . . . . .	41
3.3. Ein- und Ausgangssignale der Komponenten der WÜST . . . . .	42
3.4. Hardware für die WÜST . . . . .	43
3.5. Ein- und Ausgangssignale der Komponenten der Rückkühlung . . . . .	44
3.6. Hardware für die Rückkühlung . . . . .	44
3.7. Übersicht der Hardwareelemente . . . . .	45
4.1. Zuordnung der IP-Adressen . . . . .	46
4.2. Übersicht der P4H Modbus Register . . . . .	48
4.3. Konzept zur Leistungsregelung der P4H-Anlagen . . . . .	49
5.1. Vergleich der gemessenen und theoretischen Betriebsspannung . . . . .	60
5.2. Vergleich der theoretischen Spannung am PT1000 bei unterschiedlichen Betriebsspannungen . . . . .	61
6.1. Zahlenwerte Ein- und Ausgangsklemmen . . . . .	76
6.2. Variablen des PID-Bausteins . . . . .	81
6.3. Art der Eigenschaften Zuweisung . . . . .	89
7.1. Vergleichsmessung PT1000 . . . . .	91
7.2. Hydrostatische Drücke . . . . .	92
7.3. Ergebnisse der simulierten Leistungsregelung . . . . .	94
7.4. Bewertung Anbindung der Messtechnik . . . . .	104
7.5. Bewertung der Anwendungsfälle . . . . .	107

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Schema des Versuchsstandes . . . . .	16
1.2. Schema des Erzeugers . . . . .	16
1.3. Schema der WÜST . . . . .	17
1.4. Schema der Rückkühlung . . . . .	17
2.1. Wirkungsgrad $\eta$ und Pumpenkennlinie H . . . . .	22
2.2. Betriebspunkt des Gesamtsystems . . . . .	22
2.3. Schnittbild eines Dreiwegeventils . . . . .	23
2.4. direkter Anschluss an das Fernwärmenetz . . . . .	24
2.5. indirekter Anschluss an das Fernwärmenetz . . . . .	24
2.6. Kennlinie des Pt100 . . . . .	26
2.7. Verlauf der Stell- und Regelgröße . . . . .	33
3.1. Verbindungsplan zur Anbindung der WMZ . . . . .	37
3.2. Spannungsteiler zur Messung des PT1000 . . . . .	38
3.3. Aufbau des IC . . . . .	39
3.4. Schaltungsaufbau zur Anbindung des PT1000 an die Stromeingangsklemme . . . . .	39
3.5. Schematische Darstellung der Messtechnik des Erzeugers . . . . .	40
3.6. Schematische Darstellung der Messtechnik der WÜST . . . . .	42
3.7. Schematische Darstellung der Messtechnik der Rückkühlung . . . . .	43
3.8. Schematische Darstellung der Hardware . . . . .	45
4.1. „Screenshot“ der Webvisualisierung der P4H-Anlage . . . . .	47
4.2. Veranschaulichung der Leistungsregelung . . . . .	51
4.3. Veranschaulichung der Temperaturregelung . . . . .	52
5.1. Ansicht des WAGO Feldbuscontrollers . . . . .	55
5.2. Schematischer Aufbau der verwendeten Klemmen 750-411 und 750-455 . . . . .	56
5.3. Schematischer Aufbau der verwendeten Klemmen 750-476 und 750-559 . . . . .	56
5.4. Anschlüsse Pegelwandler . . . . .	57
5.5. Belegung des RS232 Steckers . . . . .	57
5.6. Anschluss der WMZ . . . . .	58

---

5.7. Veränderter Schaltungsaufbau zur Anbindung des PT1000 an die Stromeingangsklemme . . . . .	62
5.8. THT-Schaltung zur Temperaturmessung . . . . .	65
5.9. Anschlussplan der Drucksensoren . . . . .	66
5.10. Verkabelung des Drucksensors mit der SPS-Klemme . . . . .	66
5.11. Verkabelung eines Drucksensors . . . . .	67
5.12. Aufstellung der Steuerelemente des Heizlüfters . . . . .	68
5.13. Verkabelung des Heizlüfters mit der SPS-Klemme . . . . .	69
5.14. Schematischer Aufbau der elektrischen Schaltung für den Heizlüfter . . . . .	69
5.15. Elektrische Verschaltung des Heizlüfters . . . . .	70
5.16. Verkabelung der Pumpe mit der SPS . . . . .	71
5.17. Kabelbelegung der Anschlussklemme . . . . .	72
5.18. Verkabelung des Stellantriebs mit der SPS . . . . .	72
5.19. Verkabelung des Heizlüfters, der Pumpe und des Stellantriebes . . . . .	73
6.1. Visualisierung des Teststandes . . . . .	75
6.2. Konfiguration der Ein- und Ausgangsklemmen . . . . .	76
6.3. Variablen für die Programmierung . . . . .	77
6.4. Auszug aus der Programmierung für die Messtechnik des WÜST-Moduls . . . . .	77
6.5. Auszug aus der Programmierung für die Messtechnik des Rückkühlungs-Moduls . . . . .	78
6.6. Visualisierung der Rückkühlung . . . . .	79
6.7. Sprungantwort der Rücklauftemperatur . . . . .	80
6.8. PID-Baustein zur Temperaturregelung . . . . .	81
6.9. Sprungantwort der thermischen Leistung . . . . .	82
6.10. Sprungantwort der thermischen Leistung mit neuem Temperatursensor . . . . .	84
6.11. PID-Baustein zur Leistungsregelung . . . . .	85
6.12. Auszug aus der Programmierung für die Kommunikation mit der seriellen Schnittstelle . . . . .	87
6.13. Globale Variablenliste für das Auslesen der WMZ . . . . .	87
6.14. Auszug aus der Programmierung für das Auslesen der WMZ . . . . .	88
6.15. Code zur Erzeugung des Lebensbits . . . . .	90
6.16. Code zur Leistungssteuerung beim Betrieb von 2 P4H-Modulen . . . . .	90
7.1. Druckdifferenz an der Pumpe bezogen auf die Leistung der Pumpe . . . . .	93
7.2. Druckmessung vor und nach dem Heizlüfter . . . . .	93
7.3. Temperaturschwankungen der Vorlauftemperatur . . . . .	95
7.4. Skizze des falsch verbauten Ventils . . . . .	96
7.5. Volumenstrom an der P4H1-Anlage . . . . .	96
7.6. Thermische Leistung an der P4H1-Anlage . . . . .	97
7.7. Regelung der thermische Leistung . . . . .	98

---

7.8. Thermische Leistung bei angepasstem $K_p$ . . . . .	98
7.9. Schwankungen der thermischen Leistung abhängig von der Vorlauf- temperatur . . . . .	99
7.10. Abhängigkeit der thermischen Leistung von der Temperaturdifferenz . . .	100
7.11. Temperaturverlauf des PID-Reglers . . . . .	101
7.12. Temperaturverlauf des veränderten PID-Reglers . . . . .	101
7.13. Temperaturverlauf bei gemeinsamer Regelung . . . . .	102
7.14. Leistungsverlauf bei gemeinsamer Regelung . . . . .	103
7.15. Visualisierung mit allen erfassten Daten . . . . .	105
9.1. Skizze für die Positionsänderung des Ventils. . . . .	111

# Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$\dot{Q}$	Wärmeleistung
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\rho$	Dichte
$A$	Temperaturkoeffizient 1.Ordnung
<i>ACTUAL</i>	Istwert Regelgröße
$B$	Temperaturkoeffizient 2.Ordnung
$c_w$	Wärmekapazität
$g$	Erdbeschleunigung
<i>GND</i>	Ground
$h$	Höhe
$I$	Strom
$K_p$	Verstärkung
$K_s$	Streckenverstärkung
$p$	Druck
$p_o$	Luftdruck auf Flüssigkeitsoberfläche
$R$	Widerstand
$R_0$	Widerstand bei 0°C
$R_x$	Leitung eingehende Daten
$R_{PT1000}$	Widerstand des PT1000
<i>SET_POINT</i>	Sollwert Regelgröße
$T$	Temperatur
$T_g$	Ausgleichszeit
$T_n$	Nachstellzeit
$T_u$	Verzugszeit
$T_v$	Vorhaltezeit

---

$T_x$ .....	Leitung ausgehende Daten
$U$ .....	Spannung
$U_b$ .....	Betriebsspannung
$U_{PT1000}$ .....	Spannung am PT1000
$x$ .....	Regelgröße
$x_0$ .....	Zeitpunkt des Stellgrößensprungs
$y$ .....	Stellgröße
$Y_{MAX}$ .....	Maximum Stellgröße
$Y_{MIN}$ .....	Minimum Stellgröße
<b>AS</b> .....	Ablaufsprache
<b>AWL</b> .....	Anweisungsliste
<b>EE</b> .....	Erneuerbare Energien
<b>FBS</b> .....	Funktionsbausteinsprache
<b>FC</b> .....	Function Protocol
<b>IC</b> .....	Integrierter Schaltkreis
<b>IP</b> .....	Internet Protocol
<b>KOP</b> .....	Kontaktplan
<b>P2H</b> .....	Power-to-Heat
<b>P4H</b> .....	Power-for-Home
<b>PE1</b> .....	Druck 1 im Vorlauf des Erzeugers
<b>PE2</b> .....	Druck 2 im Vorlauf des Erzeugers
<b>PR1</b> .....	Druck im Vorlauf der Rückkühlung
<b>PR2</b> .....	Druck im Rücklauf der Rückkühlung
<b>PW1</b> .....	Druck im Rücklauf der WÜST
<b>PW2</b> .....	Druck im Vorlauf der WÜST
<b>SMD</b> .....	Surface mounted device
<b>SPS</b> .....	Speicherprogrammierbare Steuerung
<b>ST</b> .....	Strukturierter Text
<b>TCP</b> .....	Transmission Control Protocol
<b>TE1</b> .....	Temperatur 1 im Vorlauf des Erzeugers
<b>TE2</b> .....	Temperatur 2 im Vorlauf des Erzeugers
<b>TEW1</b> .....	Temperatur Vorlauf WMZ1
<b>TEW2</b> .....	Temperatur Rücklauf WMZ1
<b>TEW3</b> .....	Temperatur Vorlauf WMZ2

---

<b>TEW4</b> .....	Temperatur Rücklauf WMZ2
<b>THT</b> .....	Through-Hole-Technology
<b>TR1</b> .....	Temperatur 1 im Rücklauf der Rückkühlung
<b>TR2</b> .....	Temperatur 2 im Rücklauf der Rückkühlung
<b>TRW1</b> .....	Außentemperatur
<b>TRW2</b> .....	Rücklauftemperatur WMZ3
<b>TW1</b> .....	Temperatur im Rücklauf der WÜST
<b>TW2</b> .....	Temperatur im Vorlauf der WÜST
<b>WMZ</b> .....	Wärmemengenzähler
<b>WÜST</b> .....	Wärmeübergabestation

# 1. Einleitung

In diesem Kapitel wird die Motivation für die Thesis und die genaue Aufgabenstellung beschrieben. Außerdem wird der Aufbau der Arbeit und die Einteilung der Kapitel kurz erläutert. Danach wird beschrieben, welche Vorarbeiten zu Beginn schon getätigt worden sind.

## 1.1. Motivation

Nach Angaben des Umwelt Bundesamts wird rund die Hälfte der Endenergie in Deutschland als Prozess- und Raumwärme verbraucht. Während sich die erneuerbaren Energien (EE) im Stromsektor bereits etabliert haben, spielen sie im Wärmesektor noch eine untergeordnete Rolle. Die sogenannte „Wärmewende“ gewinnt jedoch auch politisch zunehmend an Bedeutung. [Vgl. 21]

Damit der Wandlungsprozess sowohl im Strom- als auch im Wärmesektor erfolgreich gelingen kann, ist hier umfangreicher Forschungsbedarf vorhanden. Aus diesem Grund hat die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) im Februar 2015 das Technologiezentrum Energie Campus eröffnet. Teil des Energie Campus ist das Smart-Grid-Labor. Das Zusammenspiel von Energieerzeugungs-, Verbrauchs- und Speichertechnologien soll unter realen Bedingungen erforscht und in die Lehre integriert werden. Eines der zukünftigen Themen ist die Forschung im Bereich der intelligenten Wärmenetze. Hierzu wurde ein Teststand entwickelt, der zwei Funktionen vereint. Dieser ist einerseits zum Testen von intelligenten Wärmeübergabestation ein essentieller Teil für die Forschung. Andererseits kann er als steuerbare elektrische Last verwendet werden. Dadurch kann, um den realen Betriebsfall des Gebäudes abbilden zu können, diesem eine künstliche Last aufgelegt werden.

## 1.2. Aufgabenstellung

Am Energie Campus wurde ein mobiler modularer Versuchsstand entwickelt, der als elektrische und thermische Last sowie als Teststand für eine Wärmeübergabestation

(WÜST) genutzt werden kann.

Der gelieferte Teststand wird überprüft und danach in Betrieb genommen. Im Rahmen der Bachelorarbeit soll dieser dann mit umfangreicher Messtechnik zur Erfassung von Drücken, Temperaturen und Volumenströmen angebunden werden. Es soll ein Konzept für die Messtechnik, die Steuerung und Regelung erstellt und umgesetzt werden. Vorgegeben ist, dass die Regelung mit Hilfe von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) umgesetzt wird.

Der Versuchsstand soll folgende fünf Anwendungsfälle ermöglichen:

- Fall 1a: Elektrische Last
- Fall 1b: Elektrische Last mit Vorlauftemperaturprofil
- Fall 2a: Thermische Last
- Fall 2b: Thermische Last mit Rücklauftemperaturprofil
- Fall 3: Testbetrieb Wärmeübergabestation

Für den Testbetrieb der Wärmeübergabestation soll neben der thermischen Last und der Rücklauftemperatur auch die Vorlauftemperatur vorgegeben werden.

Ziel der Arbeit ist es durch Auswahl einer passenden Hardware ein plausibles Konzept für die Steuerung und Regelung des Versuchsstandes zu entwickeln und umzusetzen. Bei der Validierung und Bewertung der Ergebnisse geht es darum, einschätzen zu können, inwiefern die Umsetzung mit dem bestehenden Versuchsstand möglich ist und ob das Konzept geeignet ist, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei soll sowohl das in der Arbeit entwickelte Konzept bewertet werden, als auch das bereits bestehende hydraulische Konzept.

### **1.3. Aufbau der Arbeit**

Als erstes werden die Vorarbeiten beschrieben. Der gelieferte Versuchsstand wird dabei erläutert, genauso wie Abweichungen von der ursprünglichen Planung. Danach folgt ein Kapitel mit Grundlagen, in dem Teile der Wärme-, Mess- und Regelungstechnik beschrieben werden. Danach werden die Konzepte für Hardware und Steuerungs- und Regelungstechnik erarbeitet. Nachdem diese vorgestellt wurden, wird die Umsetzung der Konzepte erläutert. Den Abschluss bildet die Validierung und Bewertung der Ergebnisse, in der insbesondere auf die fünf Anwendungsfälle eingegangen wird.

## 1.4. Vorarbeiten

Zum Zeitpunkt des Einstiegs in die Bachelorarbeit bestand das hydraulische Konzept des Versuchstandes bereits. Außerdem gab es Vorgaben für die Art der Messtechnik und die Stelle an der Wärmemengenzähler, Druck- und Temperatursensoren platziert werden sollen. Bild 1.1 zeigt das Schema des Versuchstandes. Bild 1.2, 1.3 und 1.4 zeigt die drei Module Erzeuger, WÜST und Rückkühlung im Detail.

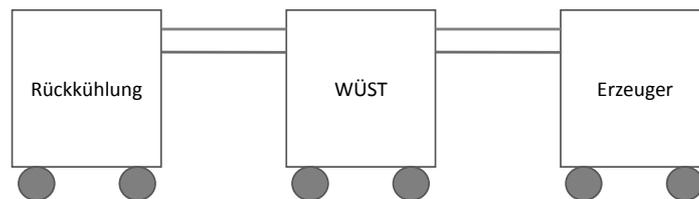


Abbildung 1.1.: Schema des Versuchstandes

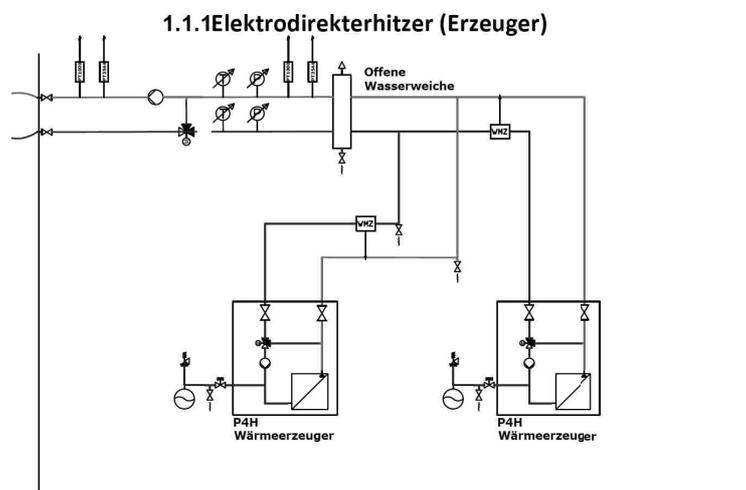


Abbildung 1.2.: Schema des Erzeugers [10]

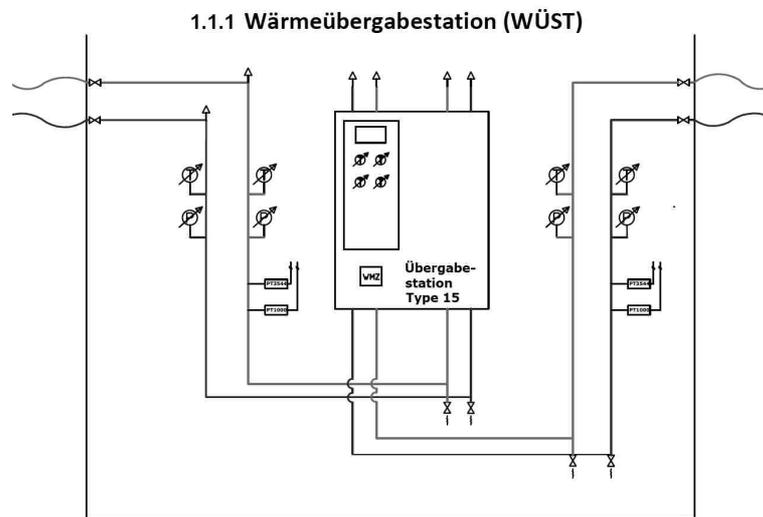


Abbildung 1.3.: Schema der WÜST [10]

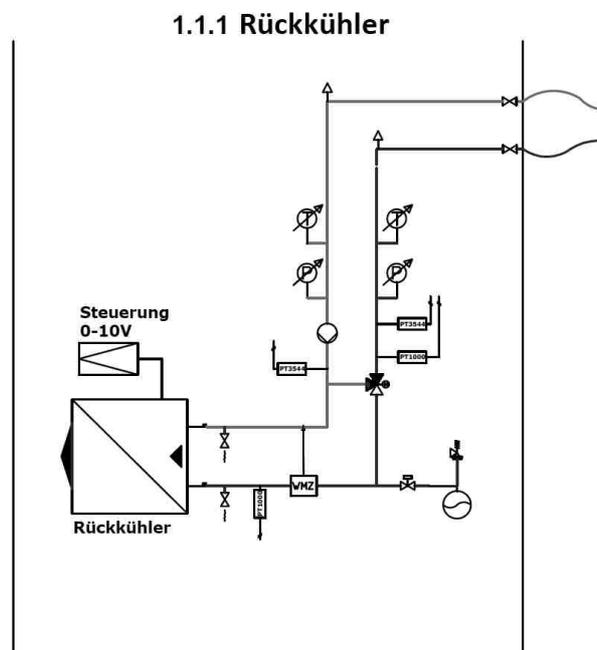


Abbildung 1.4.: Schema der Rückkühlung [10]

Das erste Modul simuliert einen Wärmeerzeuger in einem Fernwärmenetz. Es erzeugt aus Strom Wärme und gibt diese weiter an die Wärmeübergabestation. Dort wird die Wärme über einen Wärmetauscher an die Rückkühlung übergeben. Die Rückkühlung stellt einen Verbraucher dar und kühlt das Wasser mit Hilfe eines Lüfters wieder ab. Die Baugruppen sollten jeweils auf Rollwagen montiert werden und über Schläuche mit Kupplungen verbunden werden.

Durch die begrenzten Möglichkeiten der Finanzierung des Versuchsstandes verkürzte sich der Beschaffungszeitraum und es mussten bei der Bestellung Kompromisse eingegangen werden. In Tabelle 1.1 und 1.2 werden die ursprünglichen Anforderungen der Leistungsbeschreibung dargestellt. Daneben sind die Spezifikationen des durch die Leistungsbeschreibung vorgegebenen und innerhalb der kurzen Zeit umsetzbaren Versuchsstandes aufgelistet. Abweichungen von der ursprünglichen Leistungsbeschreibung sind rot markiert.

Tabelle 1.1.: Leistungsbeschreibung des Versuchsstandes

	ursprüngliche Leistungsbeschreibung	umsetzbarer Versuchsstand
<b>Elektrodirekterhitzer</b>	Maximale elektrische Leistungsaufnahme mindestens 15 kW und maximal 20 kW	2 Power-to-Heat (P2H) Anlagen mit jeweils einer Leistung von 9 kW
	Elektrische Leistung stufenlos regelbar	Elektrische Leistung stufenlos regelbar ab einer Mindestleistung von 1,2 kW
	Komplett Ansteuerbarkeit über Modbus-TCP	Auslesen der Wärmemengenzähler nur über MBus möglich
	Drehstromanschluss (400 V) über CEE-Stecker	Drehstromanschluss (400 V) über CEE-Stecker
	Vorlauftemperatur auf Sollwert regelbar (z.B. durch Rücklaufbeimischung)	Vorlauftemperatur auf Sollwert regelbar
	Messung der Wärmeleistung und aller Temperaturen	Messung der Wärmeleistung und aller Temperaturen
<b>Wärmeübergabestation</b>	Indirekte Bauart	Indirekte Bauart
	Anschlussleistung zwischen 15-20 kW	Anschlussleistung 15 kW
	Temperaturspreizung ( $\Delta T$ ) beträgt mindestens 20 K	Temperaturspreizung ( $\Delta T$ ) beträgt mindestens 20 K
	Regler Schneid-Control MR08, über Modbus-TCP ansteuerbar	Regler Schneid-Control MR08, Ansteuerung über Modbus-TCP ist ohne eine Software von Schneid nicht möglich
	Volumenstromversorgung auf Primärseite	Volumenstromversorgung auf Primärseite
	Umfangreiche Messtechnik an allen Eingängen und Ausgängen:	Umfangreiche Messtechnik an allen Eingängen und Ausgängen:
	Druck Temperatur Ventilstellung	Druck Temperatur

Tabelle 1.2.: Leistungsbeschreibung des Versuchsstandes

<b>Rückkühler</b>	Kühlleistung beträgt mindestens 25 kW	Kühlleistung beträgt 45 kW
	Verfügt über einen Regler zur:	Verfügt über einen Regler zur:
	Regelung der Rücklauftemperatur auf einen gegebenen Sollwert (Bspw. durch Vorlaufbeimischung)	Regelung der Rücklauftemperatur auf einen gegebenen Sollwert (Durch Vorlaufbeimischung)
	Regelung auf eine definierte Kühlleistung	Regelung des Heizlüfters und Regelung der Kühlleistung mit Hilfe einer Pumpe
	Ansteuerung ebenfalls über Modbus-TCP	Auslesen der Wärmemengenzähler nur über MBus möglich
	Folgende Größen sind zu messen:	Folgende Größen sind zu messen:
Alle Temperaturen Volumenstrom Wärmeleistung	Alle Temperaturen Volumenstrom Wärmeleistung	

Zur Steuerung und Regelung des Versuchsstandes sollen Speicherprogrammierbare Steuerungen der Firma WAGO Kontakttechnik GmbH & Co KG verwendet werden. Entwicklung und Umsetzung des Hardwarekonzepts für die Mess- und Regelungstechnik fallen in den Aufgabenbereich der Bachelorarbeit.

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen dargestellt. Sie beinhalten Wärmetechnik, Messtechnik, Speicherprogrammierbare Steuerungen und Regelungstechnik.

### 2.1. Wärmetechnik

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der Wärmetechnik und geht auf Teile des Wärmenetzes ein. Hydraulikkomponenten, Wärmezeugung und Wärmeübergabestationen, die für die Thesis relevant sind, werden beschrieben.

Das Wärmenetz wird sowohl zur Beheizung der Trinkwasser- als auch zur Brauchwasserversorgung genutzt. Das System besteht aus Erzeugern, die Wärme für eine Vielzahl an Verbrauchern in das Netz einspeisen. Die Wärme wird über das Wärmenetz zu den Verbrauchern transportiert und verteilt.

#### Hydraulik

Pumpen dienen in der Hydraulik zur Druckaufrechterhaltung oder zum Steigern des Volumenstroms. Damit der gewünschte Massenstrom gefördert werden kann, muss der durch das Rohrnetz verursachte Differenzdruck mittels Pumpen ausgeglichen werden. Beim Betrieb der Pumpen spielt der Wirkungsgrad und die Pumpenkennlinie eine maßgebliche Rolle. [Vgl. 30, S. 79ff]

Der Wirkungsgrad von Heizungsumwälzpumpen setzt sich aus dem hydraulischen Wirkungsgrad  $\eta_p$  und dem Motorwirkungsgrad  $\eta_m$  zusammen. Die Wirkungsgrade streuen bei verschiedenen Bauarten und Pumpengrößen in weiten Bereichen. Auch innerhalb des Kennlinienfeldes der Pumpe variiert der Wirkungsgrad zwischen null und einem Höchstwert. Dargestellt wird dies in Bild 2.1. [Vgl. 2, S. 23]

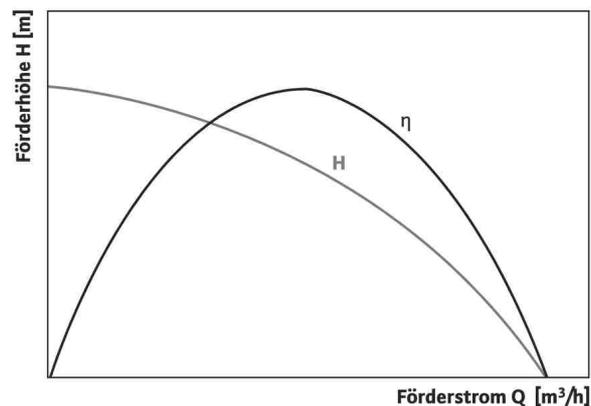


Abbildung 2.1.: Wirkungsgrad  $\eta$  und Pumpenkennlinie H [2, S.23]

Als Pumpenkennlinie wird in einem Diagramm die Abhängigkeit der erzeugten Druck-erhöhung von dem durch die Pumpe fließenden Förderstrom dargestellt. Innerhalb der Anlage entstehen Druckverluste, diese sind ebenfalls von dem Förderstrom abhängig und werden als Anlagenkennlinie dargestellt. Der aktuelle Betriebspunkt des Gesamtsystems ergibt sich in Bild 2.2 aus dem Schnittpunkt der Anlagen- und Pumpenkennlinie. Die Pumpe und die Anlage sind an diesem Punkt druckmäßig und volumenstrommäßig ausgeglichen. [Vgl. 2, S.31ff]

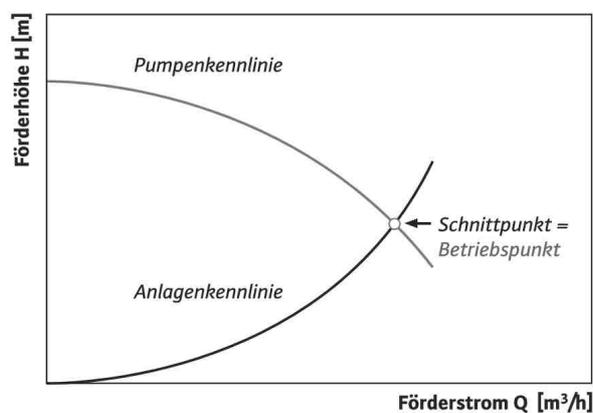


Abbildung 2.2.: Betriebspunkt des Gesamtsystems [2, S.33]

Eine weitere Hydraulikkomponente sind Ventile. Durch diese erfolgt die Druck- und Volumenstromregelung über die Freigabe von Strömungsquerschnitten. Neben anderen Bauarten gibt es die sogenannten Wegeventile. Diese geben verschiedene Wege für

die Flüssigkeit frei. [Vgl. 30, S.97ff]

Da in dem Versuchsstand Dreiwegeventile benutzt werden, werden nur diese näher beschrieben. Dreiwegeventile werden grundsätzlich zum Vermischen bzw. Umschalten von Volumenströmen bei Heizungsanlagen mit mehr als einem Erzeuger oder Wärmespeichern genutzt. Die Ventile können zwei Eingänge und einen Ausgang oder auch einen Eingang und zwei Ausgänge besitzen. Je nach Ventilstellung kann so das durchfließende Medium vermischt werden. [Vgl. 18]

Die Ventile werden in dem Versuchsstand zur Rücklauf- bzw. Vorlaufbeimischung genutzt. Die Beimischung dient entweder der Absenkung der Vorlauftemperatur oder der Erhöhung der Rücklauftemperatur. In Bild 2.3 ist das Schnittbild eines Dreiwegeventils mit zwei Eingängen und einem Ausgang dargestellt.

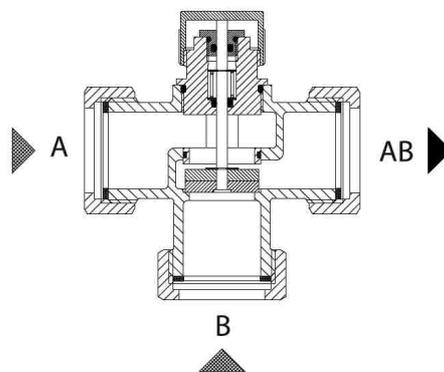


Abbildung 2.3.: Schnittbild eines Dreiwegeventils [18]

Je nach Einsatzzweck kann der gerade Durchgang von Eingang A zu Ausgang AB ganz oder teilweise geöffnet und der abgewinkelte Durchgang von Eingang B zu AB geschlossen werden. Um den Antrieb des Ventils umzusetzen, können neben manuellen Reglern auch elektrisch-motorische Stellantriebe zum Einsatz kommen. [Vgl. 19]

## Wärmeübergabestation

Beim Anschluss der Wärmeverbraucher unterscheidet man zwischen zwei Arten, dem direkten und dem indirekten Anschluss. Bei dem direkten Anschluss fließt das Wärmeträgermedium aus dem Fernwärmenetz auch durch die Hausanlage. Bei dem indirekten Anschluss trennt ein Wärmetauscher die beiden Netze voneinander. Die Trinkwassererwärmung erfolgt dabei immer indirekt. Eine vereinfachte Darstellung der Anschlussmöglichkeiten stellen Bild 2.4 und 2.5 dar. [Vgl. 15]

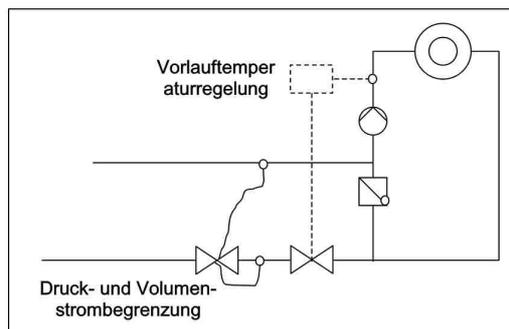


Abbildung 2.4.: direkter Anschluss an das Fernwärmenetz [15, S.3]

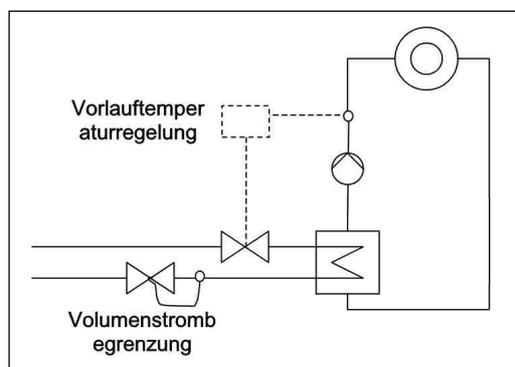


Abbildung 2.5.: indirekter Anschluss an das Fernwärmenetz [15, S.3]

Wird ein Wärmeverbraucher indirekt an das Fernwärmenetz angeschlossen, so erfolgt dies über eine Wärmeübergabestation mit Wärmetauscher. Es wird zwar auch bei einem direkten Anschluss von einer WÜST gesprochen, jedoch ist im Folgenden mit dem Namen eine Übergabestation mit Wärmetauscher gemeint. Der Wärmetauscher entkoppelt den Wasserkreislauf des Hauses von dem Fernwärmenetz hydraulisch. Die Wärme aus dem Fernwärmenetz wird dabei in das kundenseitige Netz übergeben und die gewünschte Vorlauftemperatur eingestellt. Neben dem Wärmetauscher befinden sich in der Station außerdem Regelventile, Wärmemengenzähler und ein Regler. Über den Regler kann vor allem der netzseitige Massenstrom geregelt werden. [Vgl. 15]

## Wärmeerzeugung

In dem Versuchsstand wird zur Wärmeerzeugung eine Power-to-Heat-Anlage (P2H) genutzt. Für den Versuchsstand hat die Anlage den Vorteil, dass sie eine gute Regelbarkeit als elektrische Last und für die Vorlauftemperatur besitzt. Sie kann außerdem einfach an das vorhandene Netz angeschlossen werden und es ist keine Brennstoffzufuhr nötig. Power-to-Heat beschreibt ein Verfahren, bei dem Strom genutzt wird, um Wärme zu erzeugen. Mittels Elektroden, die im direkten Kontakt mit dem zu erwärmenden Wasser stehen, wird das Wasser erhitzt. Im Gegensatz zur Elektrolyse wird kein Gleichstrom, sondern Wechselstrom verwendet, um eine Aufspaltung der Wassermoleküle zu verhindern. [Vgl. 7, S.7ff]

Vor allem durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien ist Power-to-Heat interessant geworden. In Zeiten von meteorologisch bedingten Überschusserzeugungen im Stromsektor sind Speicherkapazitäten oder eine verbesserte Flexibilität der Nachfrageseite gefragt. Die Idee kam auf, den überschüssigen Strom für die Wärmeversorgung zu nutzen. Damit kann nicht nur der Strom verwendet werden, sondern auch der Anteil der EE im Wärmesektor erhöht werden. [Vgl. 7, S.7ff]

## 2.2. Messtechnik

In diesem Kapitel wird die benötigte Messtechnik für den Versuchsstand erläutert. Dazu gehören Temperatur- sowie Drucksensoren als auch Wärmemengenzähler. Integrierte Schaltkreise (IC) gehören nicht zur Messtechnik, trotzdem wird in diesem Kapitel kurz auf sie eingegangen, da diese für eine Schaltung zur Messung der Temperaturen eine Rolle spielen.

### Temperatursensor

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Temperaturen zu messen. Ein Verfahren beinhaltet die Nutzung von temperaturabhängigen Widerständen. Die Temperaturabhängigkeit eines ohmschen Widerstands kann durch ein Polynom n-ter Ordnung beschrieben werden. Für die meisten Anwendungen können die Temperaturkoeffizienten höherer Ordnung weggelassen und nur wie in Formel 2.1 die Temperaturkoeffizienten 1. und 2. Ordnung,  $\alpha$  und  $\beta$  benutzt werden. Ein Polynom 2-ter Ordnung ist bereits ausreichend genau und die weiteren Koeffizienten sind so klein, dass sie vernachlässigt werden können.  $R_0$  steht für den Nennwiderstandswert bei  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . [Vgl. 4, S.196]

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (2.1)$$

Ein oft genutzter Widerstand zur Temperaturmessung ist der Pt100. Pt in der Normbezeichnung steht für Platin und die Zahl 100 bedeutet einen Nennwiderstand  $R_0$  von 100  $\Omega$  bei 0 °C. Für Platin gelten außerdem folgende Koeffizienten:

$$A = 3,9083 * 10^{(-3)} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (2.2)$$

$$B = 5,775 * 10^{(-7)} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (2.3)$$

Die Kennlinie des Widerstandes Pt100 ergibt sich dann wie in Bild 2.6 dargestellt.

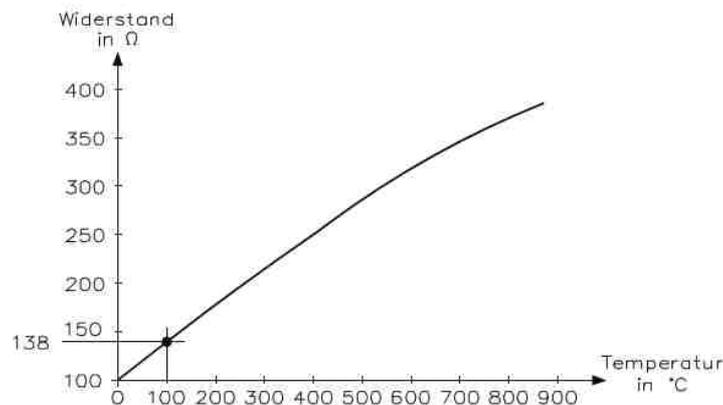


Abbildung 2.6.: Kennlinie des Pt100 [4, S.235]

In der Praxis finden sich auch Widerstände mit dem n-fachen Nennwert des Widerstandes, wie beispielsweise der Pt1000. Dieser wird in dem Versuchsstand zur Temperaturmessung verwendet. Er hat einen Nennwiderstand von 1000  $\Omega$  bei 0 °C. Wird Formel 2.1 nach der Temperatur umgestellt so ergibt sich Formel 2.4. [Vgl. 4, S.233ff]

$$T = \frac{A + \sqrt{A^2 - 4BR_0(1 - \frac{R}{R_0})}}{2B} \quad (2.4)$$

So kann über die Bestimmung des Widerstand die Temperatur berechnet werden.

## Drucksensor

Um einen Druck zu messen, wird in den meisten Fällen der Zusammenhang zwischen Kraft und Druck genutzt. Druck entspricht der Kraft pro Fläche. Wird nun die Kraft auf einer definierten Fläche bestimmt, dann kann diese in einen Druck umgeformt werden. Dadurch lässt sich die Druckmessung auf eine Kraftmessung zurückführen. Unter einer Druckmessung wird das Messen eines Drucks gegenüber einem Referenzdruck verstanden. Als Referenzdruck wird entweder der Atmosphärendruck oder in seltenen Fällen der Druck null oder ein beliebiger anderer Druck gewählt. Die internationale Einheit für Druck ist Pascal, was  $\text{N/m}^2$  entspricht. Häufig wird bei Druckmessern auch die Einheit bar verwendet. 1 bar entspricht  $10^5$  Pa. [Vgl. 11, S.178]

In einem hydraulischen System ist bei unterschiedlicher Höhe der verwendeten Drucksensoren zu berücksichtigen, dass ein hydrostatischer Druck durch die Wassersäule erzeugt wird. Das bedeutet, wenn ein Sensor unterhalb eines anderen angebracht ist, dass der gemessene Druck dort erhöht ist. Der hydrostatische Druck ergibt sich aus Formel 2.5, dem Pascal'schen Gesetz.

$$p(h) = \rho g h + p_o \quad (2.5)$$

$p_o$  ist der Luftdruck auf der Flüssigkeitsoberfläche.  $g$  ist die Erdbeschleunigung mit  $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .  $\rho$  die Dichte des Wasser von etwa  $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

## Wärmemengenzähler

Wärmemengenzähler (WMZ) ermitteln die Wärmeleistung nach der Formel 2.6.

$$\dot{Q} = \dot{V} * c_w * \rho * \Delta T \quad (2.6)$$

Die Einheit der Wärmeleistung ist  $W$ . Für die Berechnung werden die Temperaturen im Vor- und Rücklauf gemessen sowie der Volumenstrom. Die Wärmemenge ergibt sich aus der Integration der Wärmeleistung und wird in  $Wh$  angegeben. Zur Berechnung der Wärmeleistung ist deswegen neben einer Temperaturmessung auch eine Volumenstrommessung erforderlich. Das verwendete Messverfahren in diesem Fall ist die Ultraschall-Durchflussmessung. Es wird zwischen dem Laufzeitverfahren und dem Doppler-Verfahren unterschieden. [Vgl. 11, S.198]

Das Messprinzip des Laufzeitverfahrens beruht auf dem Mitführungseffekt der Schallwellen in einem reinen Fluid. In einem ruhenden Fluid breiten sich die Druckänderungen

eines Schallsignals mit Schallgeschwindigkeit aus. Dagegen können bei einem sich bewegenden Fluid Überlagerungen mit der Relativgeschwindigkeit des Schalls und der Fluidgeschwindigkeit festgestellt werden. Das Doppler-Verfahren hingegen nutzt eine Frequenzverschiebung bei der Streuung des Schallsignals an Verunreinigungen. [Vgl. 11, S.199]

## **Integrierte Schaltkreise**

Einige Schaltungen oder Schaltungsteile werden in der Elektronik immer wieder benötigt. Um diese teils komplexen Schaltungen nicht jedes Mal neu aufbauen zu müssen, werden sie in Integrierten Schaltkreisen zusammengefasst. In einem Fertigungsprozess wird eine Schaltung aus vielen elektronischen Bauteilen auf einem Trägermaterial hergestellt. Die Entwicklung der Halbleitertechnologie machte dies möglich. Die Integrierte Schaltung wird in ein Kunststoff- oder Keramikgehäuse gebettet und so vor Beschädigungen geschützt.

Bei elektronischen Bauteilen wird zwischen Bauteilen mit und ohne Drahtanschluss unterschieden. Für Durchsteckplatten werden Bauteile mit Drahtanschluss verwendet. Diese Bauteile werden durch vorgebohrte Löcher gesteckt und dann verlötet. Die Technologie nennt sich Through-Hole-Technology (THT) . [Vgl. 14]

Surface mounted device (SMD) Bauteile dagegen sind sehr klein und haben nur Anschlusskontakte, die auf die Leiterplattenoberfläche aufgebracht und verlötet werden. [Vgl. 13]

## **2.3. Speicherprogrammierbare Steuerung**

### **Hardwareaufbau**

Speicherprogrammierbare Steuerungen sind modulare, programmierbare Geräte, die je nach Anforderung anhand von Einzelmodulen zusammengesetzt werden können. Sie werden nicht als Komplettsysteme angeboten und können durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Baugruppen individuell an die Anwendung angepasst werden. Dadurch entsteht ein angepasstes Hardwaresystem, das keine ungenutzten Komponenten enthält und leicht durch zusätzliche Baugruppen ergänzt werden kann.

Im Rahmen der Bachelorarbeit werden SPS von WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG verwendet. Zur Grundausstattung dieser Steuerungen gehört ein Controller, der einen

Prozessor und Speichermodule enthält, ein Netzteil zur Stromversorgung und mindestens eine Eingangs- oder Ausgangsgruppe. Es gibt außerdem zahlreiche Baugruppen für spezielle Aufgaben, wie beispielsweise Schnittstellenerweiterungen oder Kommunikationsbaugruppen. Die Baugruppen werden als Busklemmen an den Controller angelehrt und bilden zusammen einen Feldbusknoten. Jeder Feldbusknoten muss mit einer Endklemme abgeschlossen werden. [Vgl. 16, S.517]

## Programmstruktur und Programmiersprache

Als Steuerprogramm wird für die SPS von WAGO das Programm WAGO-I/O-PRO angeboten, das auf der Software Codesys V2.3 basiert. Die Steuerprogramme bestehen allgemein aus Aufrufen von unabhängig voneinander programmierten Bausteinen.

Es gibt verschiedene Programmiersprachen für SPS und mit der Norm IEC 661131-3 wurden einige standardisiert, sodass der Austausch einer SPS mit Modellen anderer Hersteller möglich geworden ist. Die in der Norm beschriebenen Programmiersprachen sind beliebig miteinander kombinierbar und so ist es möglich die Stärken der verschiedenen Sprachen zu summieren. Folgende Sprachen sind in der Norm definiert [vgl. 16, S.517ff]:

- Anweisungsliste (AWL)
- Strukturierter Text (ST)
- Kontaktplan (KOP)
- Funktionsbausteinsprache (FBS)
- Ablaufsprache (AS)

Es wird zwischen textorientierten und graphischen Sprachen unterschieden. AWL und ST sind textorientiert, KOP und FBS dagegen graphisch und AS ist sowohl graphisch als auch textorientiert.

In der Thesis werden nur ST und FBS verwendet. Deswegen werden diese kurz erläutert.

ST ist an Hochsprachen wie Pascal oder C angelehnt und ist eine leicht lesbare Programmiersprache, die Vorteile bei verschachtelten Anweisungen bietet. Sie dient der Übersichtlichkeit des Programmes und mit ihr können Schleifen einfach implementiert werden.

FBS können abstrakt sein, bleiben dabei aber kompakt und können schnell erstellt werden. Funktionen, Funktionsblöcke und Variablen sind die wesentlichen Sprachelemente. Der Datenfluss verläuft von links nach rechts und wird durch Variablen auf beiden Seiten begrenzt. [Vgl. 16, S.520ff]

In CoDeSys erfolgt die Adressierung von Variablen ebenfalls nach der IEC61131-3 Norm. Tabelle 2.1 zeigt den Aufbau der Adressen.

Tabelle 2.1.: Aufbau einer Hardwareadresse nach IEC61131-3 [Vgl. 22, S.12]

Hardware address				Description
%				Preliminary character
	I			Input
	Q			Output
	M			Merker
		X		Bit
		B		Byte
		W		WORD (16Bit)
		D		DWORD(32Bit)
			x.y	x-Word address; y-Bit address
Examples				
	%IX1.7			Eighth Bit in second word
	%IW0			Input word 0
	%QB47			Output byte 47
	%QD2			Output double word 2
	%MX3.14			Bit 14 in merker word 3
	%MW3			Merker word 3

Nach diesem Schema lassen sich beliebige Variablen im Speicher positionieren und mittels Modbus kann auf sie zugegriffen werden. Das Modbus Protokoll wird im nächsten Abschnitt erläutert.

## Protokolle

Durch vielfältige Kommunikationsmöglichkeiten der SPS-Controller ist eine Vernetzung der Steuerungseinheiten möglich. Je nach Controller können die standardisierten seriellen Schnittstellen RS232, RS485 oder Ethernet mit dem Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) genutzt werden.

Am Energie Campus wird zur Kommunikation hauptsächlich Modbus genutzt. Für das Protokoll können die Datenübertragungsformen Modbus-ASCII, Modbus-UDP, Modbus-RTU oder Modbus-TCP gewählt werden. Bei Modbus-TCP werden die Daten binär übertragen. Als Port für Modbus ist der Port 502 reserviert. [Vgl. 22, S.52]

Das Modbus Protokoll arbeitet mit verschiedenen Grunddatentypen. Den Discrete Inputs (digitale Eingänge), den Coils (digitale Ausgänge), den Input Register (16 Bit Eingangsdaten) und den Holding Register (16 Bit Ausgangsdaten). Daraus leiten sich Funktionen ab, die Eingänge und Ausgänge lesen oder schreiben können. Die Funktionen werden mit Function Codes (FC) nummeriert. Beispielsweise FC 6 (Write single register), dessen Funktion es ist, ein einzelnes Ausgangswort zu schreiben. Vgl. [Vgl. 22, S.25]

Ein weiteres Protokoll ist M-Bus. M-Bus ist ausgerichtet auf die Fernauslesung und Fernspeisung von Verbrauchszählern, wie zum Beispiel von Wasser-, Gas- oder Wärmemengenzählern. Die Übertragung erfolgt seriell zwischen einem Master und mehreren Slaves. Der Master ist der aktive Part in der Kommunikation, der Datenanfragen stellt. Der Slave ist der passive Part, der nur auf Anfragen eine Datenantwort sendet. Dabei wird über eine Adresse der entsprechende Slave selektiert. Die Zähler übernehmen die Rolle des Slaves und senden bei Aufforderung eines Masters ihre Daten an diesen. Mittels M-Bus ist es möglich, viele Endgeräte über ein zweiadriges Kabel zu vernetzen. [Vgl. 5, S.4]

Um Verbrauchszähler auszulesen, werden sie oftmals an SPS mit einer seriellen Schnittstelle angeschlossen. Das M-Bus Protokoll funktioniert über Spannungs- bzw. Strommodulation. Der Master stellt über Spannungsmodulationen auf der Busleitung eine Anfrage. Darauf antwortet der Slave durch eine Strommodulation. Da Busspannungen bei M-Bus in anderen Bereichen liegen als für eine serielle Schnittstelle, wird ein Pegelwandler benötigt. Dieser wandelt den Pegel der seriellen Schnittstelle in die M-Bus Pegel um. [Vgl. 5, S.5]

## 2.4. Regelungstechnik

In diesem Kapitel werden nur die Teile der Regelungstechnik beschrieben, die für die Bachelorarbeit relevant sind.

Die Regelung ist ein Vorgang, bei dem eine Größe (Regelgröße) die zu regelnde Größe erfasst und mit einer anderen Größe (Führungsgröße) vergleicht. Abhängig vom Ergebnis des Vergleichs beeinflusst diese Größe die Regelgröße im Sinne einer Annäherung an die Führungsgröße. Ein geschlossener Wirkungskreislauf ist ein Kennzeichen für das Regeln. Das bedeutet, dass die Regelgröße sich im Regelkreis fortlaufend selbst beeinflusst. [Vgl. 17, S.116]

Eine grundlegende Aufgabe der Regelungstechnik ist, das Verhalten des Regelgliedes so zu gestalten, dass die Anforderungen an die Regelung bestmöglich erfüllt werden.

Um das Verhalten von Regelkreisen zu berechnen, müssen mathematische Modelle des Übertragungsverhaltens gegeben sein. Es gibt einige wenige elementare Übertragungsglieder, die die Grundlage für regelungstechnische Probleme liefern. Aus ihnen lassen sich komplexere Übertragungsglieder aufbauen. Es handelt sich um das P-, das I-, das D- und das  $T_t$ -Glieder. In Tabelle 2.2 werden die Übertragungsglieder mit der dazugehörigen Differentialgleichung und der Übertragungsfunktion dargestellt. [Vgl. 17, S.115]

Tabelle 2.2.: Darstellungsform einfacher Übertragungsglieder [Vgl. 17, S.115]

Übertragungsglied	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion
P	$v = K_p u$	$k_p$
$T_t$	$v = K_p u(t - T_t)$	$K_p e^{(-T_t s)}$
I	$\dot{v} = K_I u$	$\frac{K_I}{s}$
D	$v = K_D \dot{u}$	$K_D s$

Der PID-Regler ist Standard für die Regelung von Temperaturen und enthält einen P-, I-, und D-Anteil. Die Buchstaben bezeichnen Proportionalverstärkung, Integration und Differentiation der Regeldifferenz. Das Übertragungsverhalten eines PID-Reglers wird in Formel 2.7 dargestellt. [Vgl. 17, S.156ff]

$$G_R(s) = K_{PR} + \frac{K_{IR}}{s} + K_{DR} s \quad (2.7)$$

Da in der Praxis ein mathematisches Modell der Regelstrecke oft nicht vorhanden ist, werden die Koeffizienten  $K_s$  (Streckenverstärkung),  $T_u$  (Verzugszeit) und  $T_g$  (Ausgleichszeit) über eine Sprungantwort bestimmt. Das bedeutet, dass auf die Stellgröße  $y$  ein Sprung gegeben wird. Die Antwort der Regelgröße  $x$  wird aufgezeichnet und ausgewertet. Bild 2.7 stellt einen beispielhaften Verlauf der Stell- und Regelgröße dar. [Vgl. 3, S.6f]

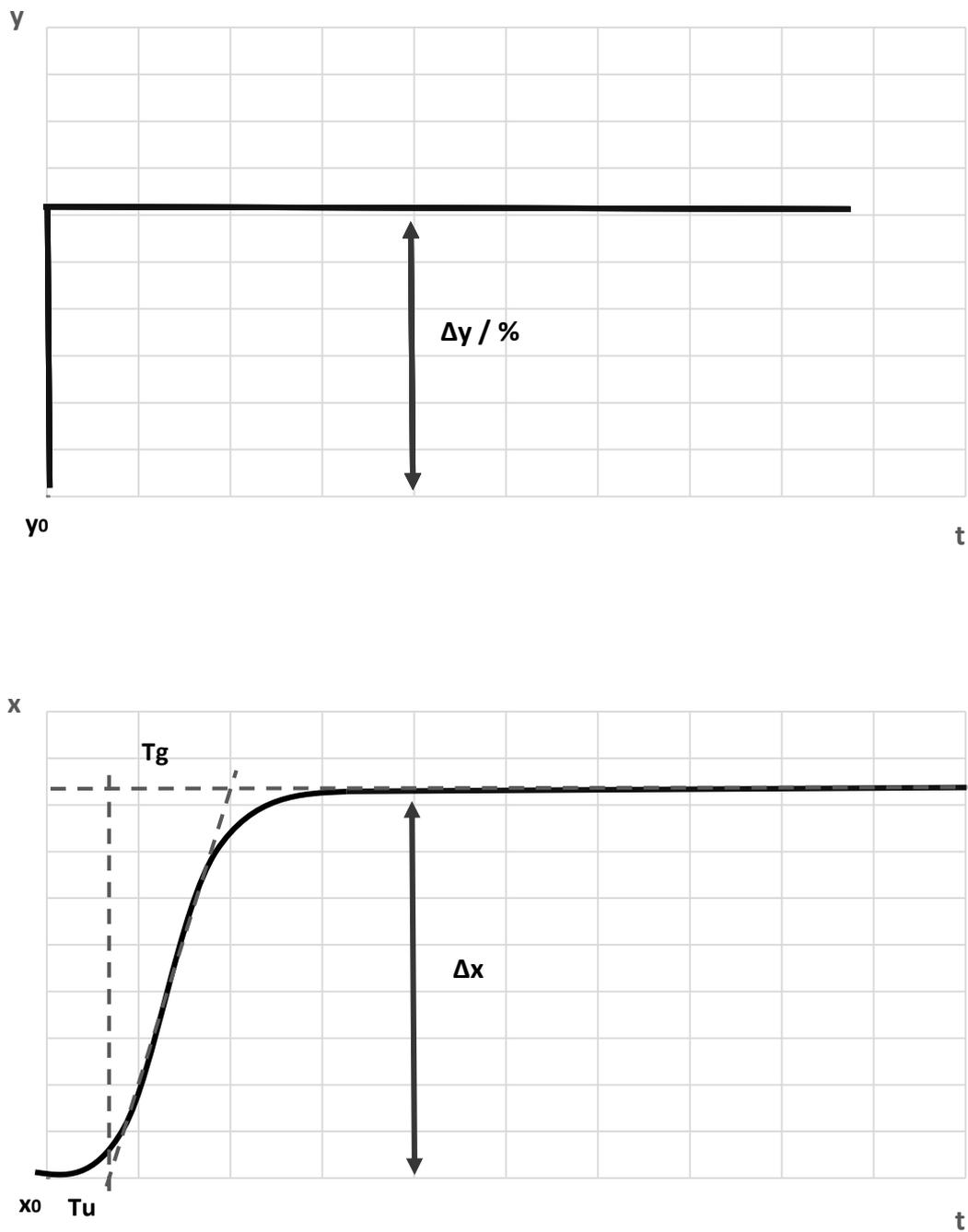


Abbildung 2.7.: Verlauf der Stell- und Regelgröße [Vgl. 3, S.6]

Um den Parameter  $K_s$  festzulegen, wird die prozentuale Änderung der Regelgröße durch die Stellgröße geteilt. Für die Verzugszeit- und Ausgleichzeitbestimmung wird eine Tangente in die Kurve eingezeichnet. Die Tangente erreicht sowohl den Anfangswert  $x_0$  als auch den Endwert.  $T_u$  ist die Zeit zwischen Beginn der Veränderung an  $y$  und dem Schnittpunkt der Tangente mit der Zeitachse.  $T_g$  ist die Zeit zwischen dem Schnittpunkt mit der Zeitachse und dem Schnittpunkt des Endwertes. Aus diesen Parametern können die Parameter  $K_p$ ,  $T_n$  und  $T_v$  eines PID-Regler errechnet werden. [Vgl. 3, S.9]

$$K_p = \frac{0,6T_g}{K_s T_u}$$
$$T_n = T_g$$
$$T_v = 0,5 * T_u$$

Der PID-Regler wird mit den Parametern in Betrieb genommen und erneut der Kurvenverlauf der Regelgröße bei einem Sprung der Stellgröße aufgenommen. Je nach Verlauf der Kurve können die Parameter verändert werden bis ein optimaler Verlauf sichergestellt wurde.

## 3. Hardwarekonzept

Bevor das Steuerungs- und Regelungskonzept entwickelt und umgesetzt werden kann, muss ein Hardwarekonzept erstellt werden. In diesem Kapitel wird das Konzept erstellt. Es werden bereits Vorüberlegungen zum Steuerungs- und Regelungskonzeptes gemacht, da diese auch für das Hardwarekonzept relevant sind. Das genaue Konzept wird allerdings im Kapitel Steuerungs- und Regelungskonzept beschrieben.

Es wäre möglich, den Versuchsstand nur mit einem Schaltschrank und einer SPS zu bestücken. Das würde die Kosten für die Hardware verringern. Allerdings können die Module dann nicht unabhängig voneinander genutzt werden. Für eine bestmögliche Nutzung des Versuchsstandes in Interaktion mit den am Energie-Campus bereits vorhandenen Anlagen ist dies jedoch eine Voraussetzung. Zusätzlich wären lange Leitungen und daraus resultierende Messfehler die Folge. Deswegen wird jedes Modul (Erzeuger, WÜST, Rückkühler) mit einem Schaltschrank und einer eigenen SPS versehen.

Zur Übersichtlichkeit der Regelung soll auf einer SPS eine Visualisierung der Daten erfolgen. Diese SPS dient als Master und ihr sind die beiden anderen SPS und die P4H-Anlagen als Slaves untergeordnet. Am besten ist hierfür die SPS des Erzeugers geeignet, da sie ohnehin mit den beiden P2H Anlagen verbunden werden muss.

Die Wärmemengenzähler und Druck- und Temperatursensoren sind bereits verbaut. Der elektrische Anschluss der Messtechnik, der Pumpen, der Stellantriebe für Vor- und Rücklaufbeimischung und des Ventilators muss noch erfolgen. Bevor mit einer Verkabelung der Komponenten begonnen werden kann, müssen die Steuerungen ausgesucht und beschafft werden. Als erstes wird hierfür die Methodik zur Konzepterstellung erläutert.

### 3.1. Methodik

Um ein systematisches Vorgehen zu gewährleisten, stellen sich folgende Fragen:

- Welche und wie viele Komponenten gibt es, die mit der SPS verbunden werden?
- Haben die Komponenten besondere Anforderungen an den Controller?
- Welche SPS-Controller werden benötigt?

- Welche Eingangssignale erwarten die Komponenten, bzw. welche Ausgangssignale liefern sie?
- Gibt es Eingangs- oder Ausgangsklemmen, die diesen Anforderungen entsprechen?
  - Wenn ja, wie viele werden benötigt?
  - Wenn nein, wie können die Komponenten anderweitig mit der SPS verbunden werden?

Die drei Module werden getrennt betrachtet und danach eine Übersicht über das Gesamtkonzept gegeben. Abweichend von der ursprünglich Anforderung sind die Wärmemengenzähler nur über M-Bus und nicht über Modbus auslesbar. Deswegen wird im folgenden Kapitel ein Konzept zur Wandlung von M-Bus auf Modbus beschrieben, da sich dieses auf die Wahl der Controller auswirkt.

Für den direkten Anschluss von Temperatursensoren wie den PT1000 gibt es Eingangsklemmen von WAGO. Allerdings sind bereits Stromeingangsklemmen vorhanden, die für den PT1000 genutzt werden sollen. In Kapitel Anbindung Temperatursensoren wird eine Möglichkeit der Anbindung beschrieben.

## 3.2. Anbindung Wärmemengenzähler

Um die Daten von den Wärmemengenzählern auswerten zu können, müssen diese von M-Bus auf Modbus gewandelt werden. Die Anbindung von Energiezählern über eine M-Bus kann über eine serielle Schnittstelle an eine SPS des WAGO-I/O-System 750 erfolgen. [Vgl. 27]

In Bild 3.1 wird der Verbindungsplan dargestellt. Ein Controller kann mit einer WAGO-Klemme als serielle Schnittstelle RS-232 C ergänzt werden. Da noch kein SPS-Controller bestellt wurde, kann auf die Klemme verzichtet werden und direkt ein Controller mit serieller Schnittstelle genutzt werden.

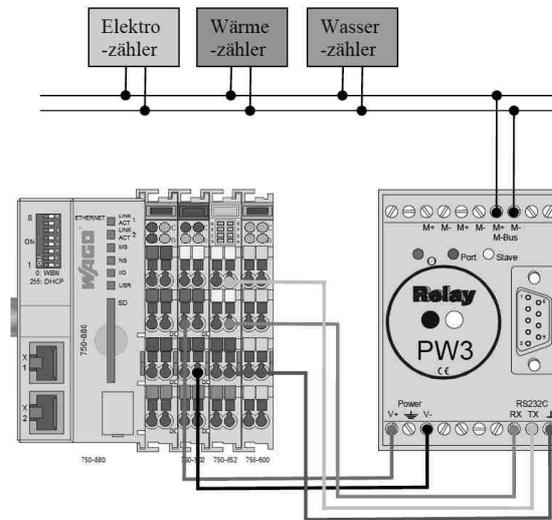


Abbildung 3.1.: Verbindungsplan zur Anbindung der WMZ [27, S.7]

Es wird für die Wandlung außerdem ein Pegelwandler benötigt. Ein WMZ befindet sich am Modul der Rückkühlung, die anderen beiden am Erzeuger. Da eine doppelte Realisierung der Wandlung zu kostenintensiv ist, werden die WMZ an einem Modul zusammengeführt und am Pegelwandler parallel verschaltet. Weil sich an dem Erzeuger zwei WMZ befinden, wird dort die Wandlung realisiert.

In dem Verbindungsplan sind drei unterschiedliche Zähler enthalten. In diesem Fall handelt es sich um drei Wärmemengenzähler, die parallel an den Pegelwandler angeschlossen werden.

### 3.3. Anbindung Temperatursensoren

Um den Widerstand am PT1000 mit einer Stromeingangsklemme messen zu können, wird eine zusätzliche Schaltung benötigt. In dieser soll der PT1000 wie in Bild 3.2 zu sehen, als Teil eines Spannungsteilers eingesetzt werden. Danach soll diese Spannung mittels eines IC in einen Strom von 4-20 mA gewandelt werden.

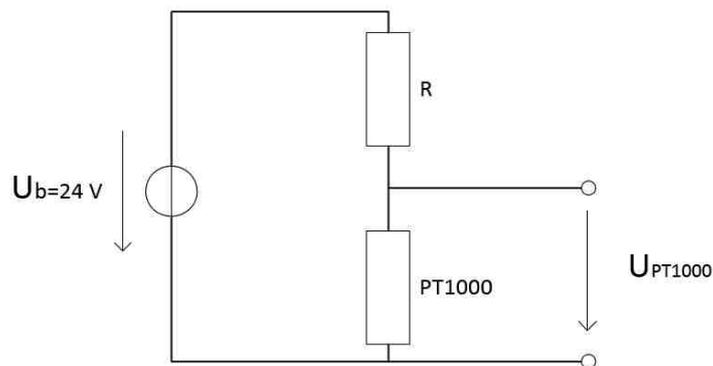


Abbildung 3.2.: Spannungsteiler zur Messung des PT1000

Bei dem ausgesuchten IC handelt es sich um den AD694 von Analog Devices. Dieser wandelt Spannungen im Bereich von 0-10 V in Ströme von 4-20 mA. Um die Schaltung realisieren zu können, muss der Widerstand  $R$  im Spannungsteiler so ausgelegt werden, dass die abfallende Spannung über dem PT1000 ( $U_{PT1000}$ ) maximal 10 V beträgt. Über Formel 3.1 lässt sich die Spannung  $U_{PT1000}$  bei gegebenem Widerstand  $R$  und Betriebsspannung  $U_b$  bestimmen.

$$U_{PT1000} = \frac{R_{PT1000}}{R_{PT1000} + R} * U_b \quad (3.1)$$

Die Formel 3.1 wird nach  $R$  umgestellt und für den PT1000 ein Widerstand von maximal  $1308,93\ \Omega$  angenommen, was einer Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  entspricht. Die Spannung über dem PT1000 soll dann maximal 10 V betragen. Aus der Formel 3.2 ergibt sich ein minimaler Wert für  $R$  von  $1833\ \Omega$ .

$$R = \left( \frac{24\text{V}}{10\text{V}} - 1 \right) * 1308,93\ \Omega \quad (3.2)$$

Für die Schaltung wurde ein Widerstand mit  $1870\ \Omega$  gewählt. In Bild 3.3 ist der grundsätzliche Aufbau des genutzten IC's abgebildet. Zusammen mit dem Spannungsteiler ergibt sich die in Bild 3.4 dargestellte vereinfachte Schaltung. Dort ist auch die Belegung der Pins für diese Anwendung zu erkennen. [Vgl. 1]

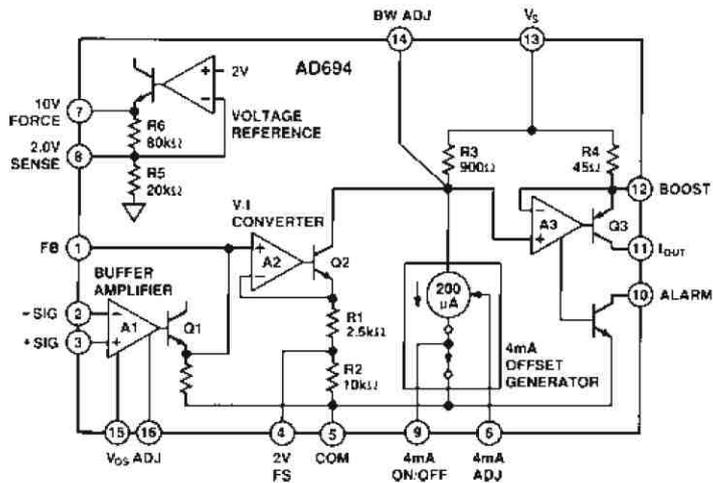


Abbildung 3.3.: Aufbau des IC [1]

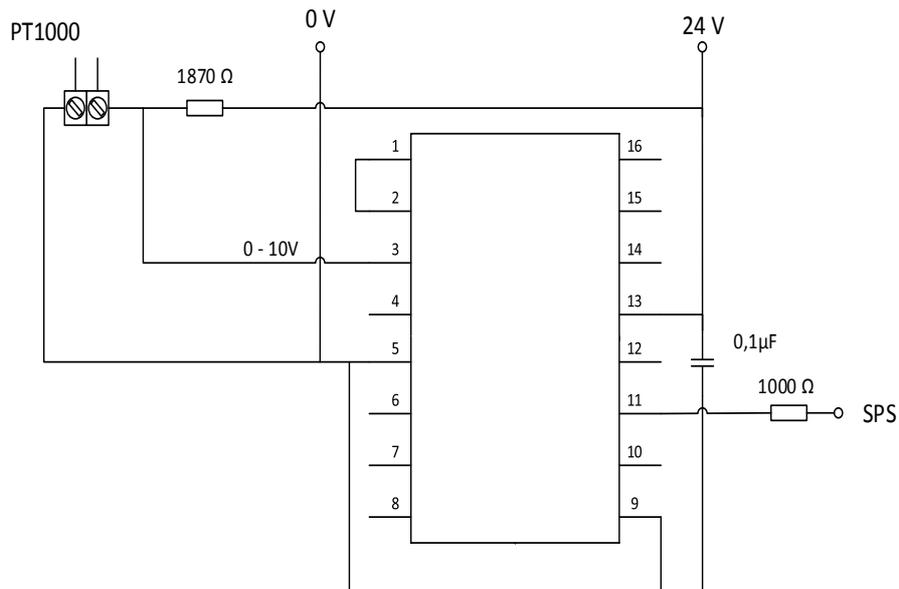


Abbildung 3.4.: Schaltungsaufbau zur Anbindung des PT1000 an die Stromeingangsklemme

Alle nicht belegten Pins des IC's spielen in diesem Fall keine Rolle. Pin 1 und 2 werden verbunden, damit eine Gegenkopplung am Operationsverstärker realisiert wird, die

als Spannungsfollower fungiert und die Impedanz für den U/I Wandler wandelt. Pin 3 ist der Spannungseingang an den eine Spannung zwischen 0 und 10 V angelegt werden kann. Pin 5 liegt auf Masse und ist mit Pin 9 verbunden. Wird die Spannung an Pin 9 auf über 3 V angehoben, dann wird der Offset von 4 mA ausgeschaltet. In diesem Fall ist dieser jedoch erwünscht. Pin 11 liefert den Ausgangsstrom und kann bei einer Betriebsspannung von 24 V mit maximal  $1100 \Omega$  belastet werden. An Pin 13 liegt die Versorgungsspannung an. Zur Spannungsstabilisierung ist der Pin zusätzlich über einen  $0,1 \mu\text{F}$  Kondensator mit Pin 5 verbunden. [Vgl. 1]

Die Schaltung soll auf eine Platine gelötet werden. Mit Hilfe von Kabelklemmen, die ebenfalls auf die Platine gelötet werden, kann der PT1000 angeschlossen werden.

### 3.4. Erzeuger

Das erste Modul enthält die in Bild 3.4 dargestellten Komponenten.

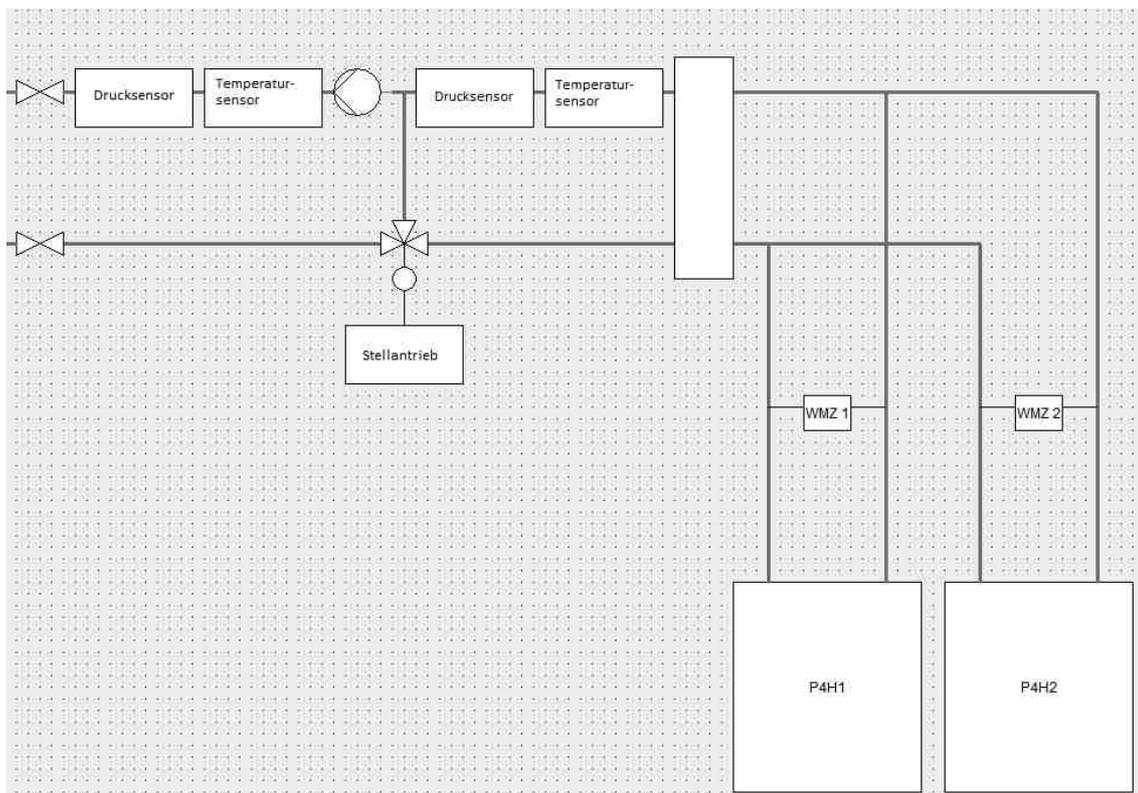


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung der Messtechnik des Erzeugers

Mit der SPS müssen zwei Temperatursensoren, zwei Drucksensoren, zwei Wärmemengenzähler und ein Stellantrieb verbunden werden. Außerdem sollen die P4H-Anlagen über Modbus TCP mit der SPS verbunden sein. Die Pumpe regelt nach dem Differenzdruck variabel und muss nicht von der SPS angesteuert werden. Der SPS-Controller muss über Modbus-TCP kommunizieren können und eine Möglichkeit bieten, eine statische IP zu setzen. Der Controller benötigt darüber hinaus eine serielle Schnittstelle RS232 für die Wandlung von M-Bus auf Modbus zum Auslesen der Wärmemengenzähler. Ansonsten haben die bisher betrachteten Komponenten keine besonderen Anforderungen an den Controller.

Die Tabelle 3.1 zeigt die Komponenten mit ihren Ein- und Ausgangssignalen. Als Eingangssignal wird in dieser Tabelle das hereinkommende Signal aus Sicht der Komponenten beschrieben.

Tabelle 3.1.: Ein- und Ausgangssignale der Komponenten des Erzeugers

Erzeuger			
Komponenten	Herstellerbezeichnung	Ein-/Ausgangssignal	Versorgungsspannung
2 Temperatursensoren	PT1000	Widerstand zwischen etwa 1050 und 1400 $\Omega$	
2 Drucksensoren	Siemens QBE2003	0-10 V Ausgangssignal	24 V
2 Wärmemengenzähler	allmess Integral-V UltraLite	M-Bus	Batteriebetrieben
1 Stellantrieb	Oventrop Aktor M ST	0-10 V Ausgangs- und Eingangssignal	24 V
Pumpe	Cosmo CPE	-	230 V

Von WAGO gibt es eine Vielzahl an Klemmen. Die in Tabelle 3.2 abgebildeten Klemmen eignen sich in diesem Fall am besten oder sind wie im Fall der Temperatursensoren bereits vorhanden. Bei der Bezeichnung der Klemmen ist zu berücksichtigen, dass die Signale aus Sicht der Klemme bezeichnet wurden und nicht wie in Tabelle 3.1 aus Sicht der Komponenten. Dies gilt auch für die nachfolgenden Tabellen 3.4 und 3.6.

Tabelle 3.2.: Hardware für den Erzeuger

Erzeuger		
Bezeichnung	WAGO Artikel-Nr.	angeschlossene Komponenten
Controller	750-880/025-000	
2-K-Analogeingangsklemme 0-10 V	750-476	2 Drucksensoren
4-K Analogausgangsklemme 0-10 V	750-559/025-000	Stellantrieb Ausgang
4-K Analogeingangsklemme 4-20mA, Single Ended	750-455	2 Temperatursensoren
Endklemme	750-460	

### 3.5. Wärmeübergabestation

Die Komponenten für die WÜST sind in Bild 3.6 zu sehen und in Tabelle 3.3 mit den Ein- und Ausgangssignalen zusammengefasst.

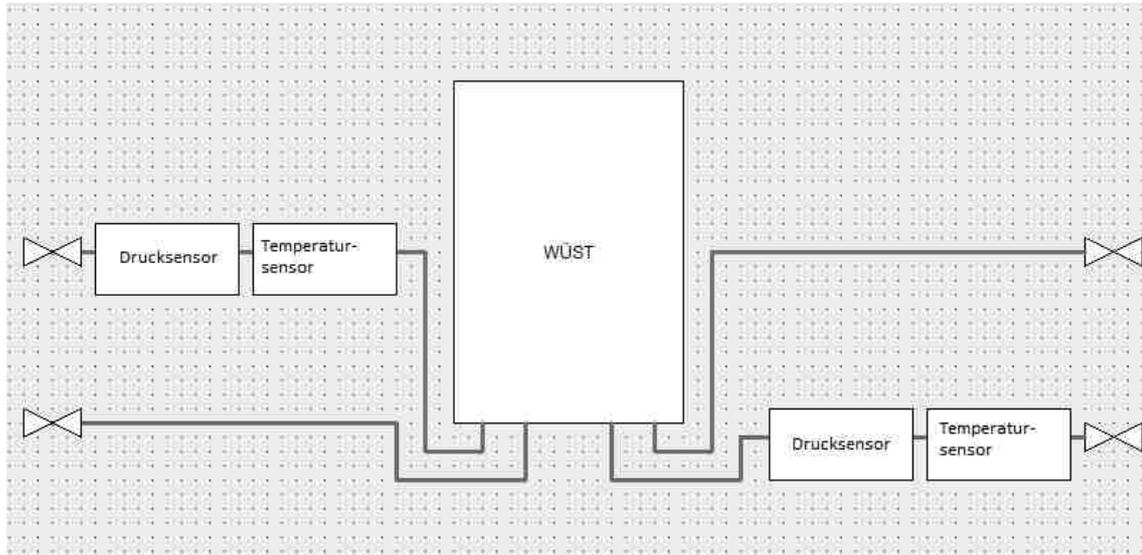


Abbildung 3.6.: Schematische Darstellung der Messtechnik der WÜST

Tabelle 3.3.: Ein- und Ausgangssignale der Komponenten der WÜST

WÜST			
Komponenten	Herstellerbezeichnung	Ein-/Ausgangssignal	Versorgungsspannung
2 Temperatursensoren	PT1000	Widerstand zwischen etwa 1050 und 1400 $\Omega$	
2 Drucksensoren	Siemens QBE2003	0-10 V Ausgangssignal	24 V

Mit der SPS müssen lediglich zwei Drucksensoren und zwei Temperatursensoren verbunden werden. Der Controller muss ebenfalls über Modbus TCP kommunizieren können und eine statische IP zugewiesen bekommen. Ansonsten gibt es keine Anforderungen an den Controller. Die Tabelle 3.4 führt WAGO Klemmen auf, die diese Anforderungen erfüllen.

Tabelle 3.4.: Hardware für die WÜST

WÜST		
Bezeichnung	WAGO Artikel-Nr.	angeschlossene Komponenten
Controller	750-880	
2-K-Analogeingangsklemme 0-10 V	750-476	2 Drucksensoren
4-K-Analogeingangsklemme 4-20 mA, Single Ended	750-455	2 Drucksensoren, 2 Temperatursensoren
Endklemme	750-600	

### 3.6. Rückkühlung

In Bild 3.7 ist der Aufbau der Rückkühlung und die Messtechnik zu sehen. An die SPS der Rückkühlung sollen neben zwei Temperatur- und Drucksensoren eine Pumpe, ein Stellantrieb, ein Wärmemengenzähler und der Heizlüfter angeschlossen werden. Die Tabelle 3.5 zeigt eine Übersicht der Signale und Tabelle 3.6 die ausgewählten WAGO-Klemmen.

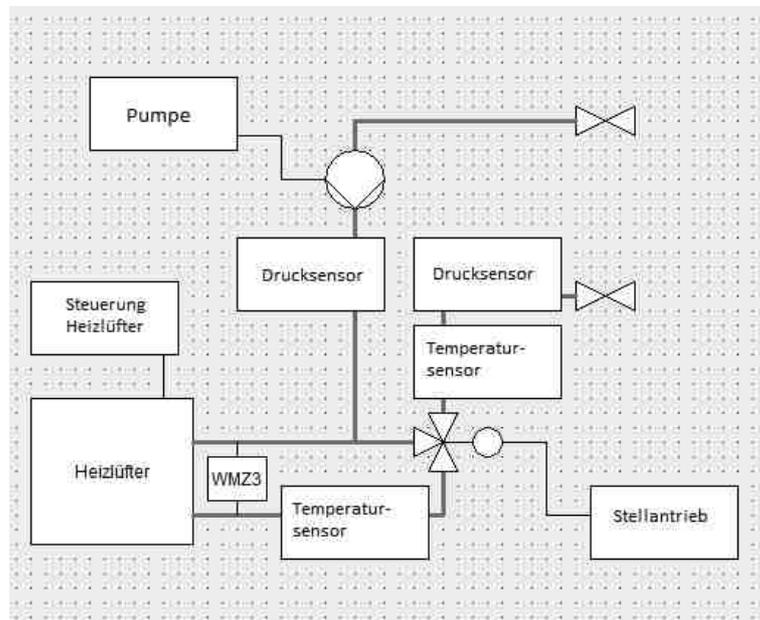


Abbildung 3.7.: Schematische Darstellung der Messtechnik der Rückkühlung

Tabelle 3.5.: Ein- und Ausgangssignale der Komponenten der Rückkühlung

Rückkühlung			
Komponenten	Herstellerbezeichnung	Ein-/Ausgangssignal	Versorgungsspannung
2 Temperatursensoren	PT1000	Widerstand zwischen etwa 1050 und 1400 $\Omega$	
2 Drucksensoren	Siemens QBE2003	0-10 V Ausgangssignal	24 V
1 Wärmemengenzähler	allmess Integral-V UltraLite	M-Bus	Batteriebetrieben
1 Stellantrieb	Oventrop Aktor M ST	0-10 V Ausgangs- und Eingangssignal	24 V
Pumpe	Wilo-Stratos PARA/-Z	0-10 V Eingangssignal	230 V
Lufterhitzer	Cosmos LH Classic 45	0-10 V Eingangssignal	230 V

Tabelle 3.6.: Hardware für die Rückkühlung

Rückkühlung		
Bezeichnung	WAGO Artikel-Nr.	angeschlossene Komponenten
Controller	750-8202/025-001	
2-K-Digitaleingangsklemme DC 24 V	750-411	Spannungsversorgung
2-K-Analogeingangsklemme 0-10 V	750-476	2 Drucksensoren
2-K-Analogeingangsklemme 0-10 V	750-476	Stellantrieb Eingang
4-K Analogausgangsklemme 0-10 V	750-559/025-000	Stellantrieb Ausgang, Lufterhitzer, Pumpe
4-K-Analogeingangsklemme 4-20 mA, Single Ended	750-455	2 Temperatursensoren
Endklemme	750-600	

Die Anforderungen an den Controller wurden in den Kapiteln Erzeuger und Wärmeübergabestation bereits genannt und treffen auch in diesem Fall zu. Für die Spannungsversorgung wird zusätzlich eine Klemme genutzt an der 24 V für die Sensoren abgegriffen werden können, da nicht alle Kabel zur Spannungsversorgung an den Controller der SPS angeschlossen werden können.

### 3.7. Gesamtkonzept

Abgesehen von der bisher genannten Hardware fehlen noch weitere Bauteile. Für jede SPS wird ein Netzgerät für die Betriebsspannung benötigt. Da die SPS des Erzeugers

als Master fungiert und über Modbus-TCP mit den Slaves kommuniziert, müssen diese über Netzkabel mit dem Master verbunden werden. Es gibt vier Slaves und eine Verbindung zu dem Laptop auf dem die Programmierung stattfindet, sodass ein Switch mit mindestens sechs Kanälen eingesetzt werden muss. Aus den vorherigen Überlegungen ergibt sich der in Bild 3.8 gezeigte Aufbau der Hardware.

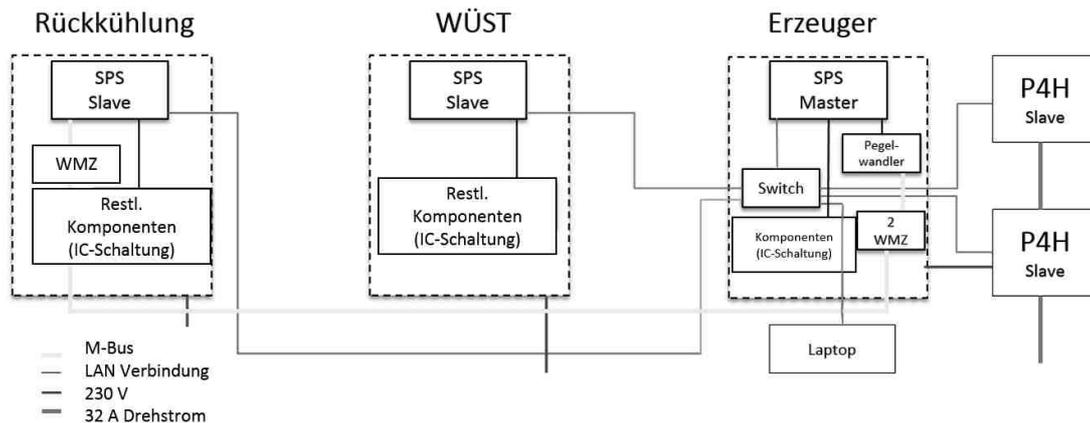


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung der Hardware

In Tabelle 3.7 werden abschließend alle benötigten Hardwareelemente zusammengefasst.

Tabelle 3.7.: Übersicht der Hardwareelemente

Hardware von WAGO
2 Controller + Netzgerät
Controller mit serieller Schnittstelle + Netzgerät
4 x 2-K-Analogeingangsklemme 0-10 V
2 x 4-K Analogausgangsklemme 0-10 V
3 x 4-K Analogeingangsklemme 4-20mA
1 x 2-K-Digitaleingangsklemme DC 24 V
3 x Endklemme
<b>zusätzliche Hardware:</b>
6 x Schaltung mit IC
Netzkabel
Switch mit mindestens 6 Kanäle
Pegelwandler

## 4. Steuerungs- und Regelungskonzept

Nachdem das Hardwarekonzept besteht, muss nun ein Konzept für die Steuerung- und Regelung erstellt werden. Um überhaupt auf die Steuerungen zugreifen zu können, soll der Versuchsstand in das Gebäudeleittechnik Netzwerk eingebunden werden. Die IP-Adressen der Teilnehmer müssen dafür mit 192.168.241. beginnen. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der IP-Adressen, die den Teilnehmern zugeordnet werden.

Tabelle 4.1.: Zuordnung der IP-Adressen

Netzwerkteilnehmer	IP-Adresse
Laptop	192.168.241.160
P4H1 (ohne Display)	192.168.241.161
P4H2	192.168.241.162
Erzeuger SPS	192.168.241.163
WÜST SPS	192.168.241.164
Rückkühlung SPS	192.168.241.165

Zuerst wird beschrieben wie bei der Konzepterstellung vorgegangen werden soll.

### 4.1. Methodik

Bei der Hardwarekonzeptentwicklung wurde bereits festgelegt, dass die Aufteilung auf drei SPS sinnvoll ist. Nun soll pro Steuerung ein Konzept entwickelt werden, mit dem die Regelung des jeweiligen Moduls umgesetzt werden kann. Zur Konzepterstellung werden die in der Aufgabenstellung genannten fünf Anwendungsfälle als Grundlage genutzt.

- Fall 1a: Elektrische Last
- Fall 1b: Elektrische Last mit Vorlauftemperaturprofil

- Fall 2a: Thermische Last
- Fall 2b: Thermische Last mit Rücklauftemperaturprofil
- Fall 3: Testbetrieb Wärmeübergabestation

Die Vorlauftemperatur und die elektrische Leistung müssen am Erzeuger geregelt werden. Die thermische Leistung und die Rücklauftemperatur dagegen an der Rückkühlung. Das Konzept wird deswegen in den folgenden Kapiteln pro Modul entwickelt.

## 4.2. Power-for-Home-Anlage

Die Power-for-Home-Anlagen (P4H) sind ein Prototyp der Firma Enerpipe GmbH. Sie haben eine eigene Regelung, die vom Hersteller erstellt wurde. Vorgegebene Werte können über Modbus gelesen und geschrieben werden. Außerdem kann auf eine Webvisualisierung des Herstellers zugegriffen werden, die alle aktuellen Werte anzeigt. Bild 4.1 zeigt diese Visualisierung. Auf einer der beiden Anlagen wird die Visualisierung auf einem in den Schaltschrank integrierten Display angezeigt. [Vgl. 9]

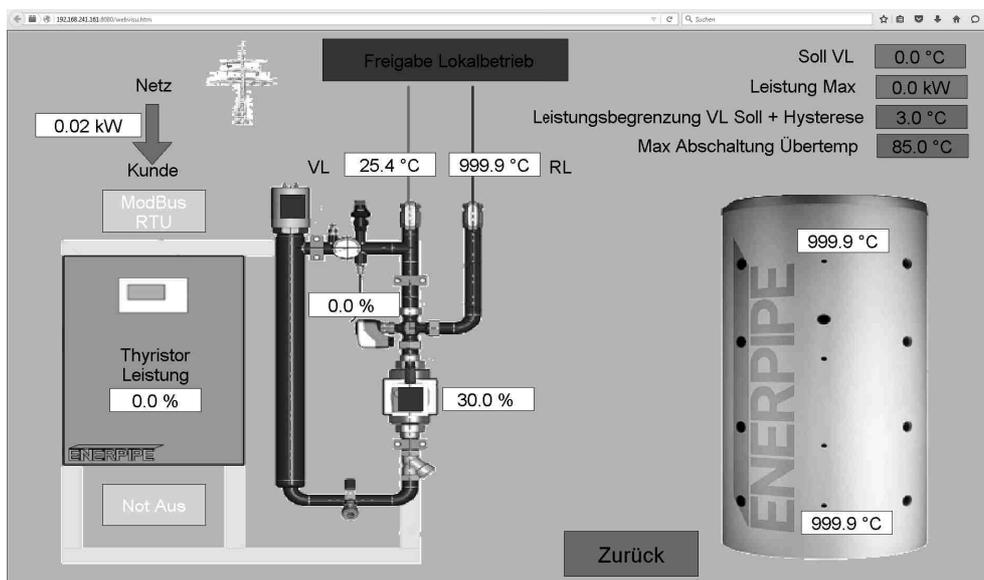


Abbildung 4.1.: „Screenshot“ der Webvisualisierung der P4H-Anlage

Die Temperaturen im Speicher und im Rücklauf werden momentan nicht erfasst. Laut Hersteller müssen die Sensoren jedoch nur angeklemt werden um Werte zu erhalten.

Für die Inbetriebnahme des Teststandes hat dies keine hohe Priorität. In Tabelle 4.2 stehen die Register aus denen die Werte der P4H Anlagen abgefragt werden können.

Tabelle 4.2.: Übersicht der P4H Modbus Register

Array	Bezeichnung
0	Lebensbit von P4H
1	ModBus RTU zu Zähler OK
2	Betrieb Pumpe
3	Betrieb Thyristor
4	NotAus OK
5	Mischer Fährt Auf
6	Mischer Fährt Zu
7	P4H in Externbetrieb
8	P4H In Lokalbetrieb
15	Temp VL Fühler (°C x10)
16	Temp RL Fühler
17	Temp Speicher Oben Fühler
18	Temp Speicher Unten Fühler
19	Anzeige Drehzahl Pumpe (%)
20	Anzeige Stellwert Ventil (%)
21	Anzeige Stellwert Thyristor (%)
22	Leistung Stromzähler (kW)
23	Zählerstand Stromzähler (Mwh)
35	Lebensbit zur P4H
36	Freigabe P4H für Externbetrieb
37	Solltemperatur Vorlauf (°C x10)
38	Maximale Leistung (kW x10)

Die Daten sind als Datentyp Word deklariert. Auf Register 0 liegt das Lebensbit der Anlagen, welches innerhalb von 10 s zwischen 0 und 1 wechselt. Als Antwort benötigen die Anlagen ebenfalls alle 10 s ein wechselndes Bit auf Register 35. Außerdem muss für die Kommunikation das Register 36 auf 1 gesetzt werden, damit der externe Betrieb der Pumpe und des Thyristors freigegeben ist. Bei der Anlage ohne Display muss zusätzlich manuell ein Schalter auf „Externen Betrieb“ gestellt werden. Danach können Daten über Modbus gelesen und geschrieben werden. [Vgl. 9]

Die Anlagen haben eine Mindestleistung von 1,2 kW. Wird die zweite Anlage dazugeschaltet, entsteht dadurch ein Leistungssprung von 1,2 kW.

Zur gemeinsamen Steuerung dient das folgende Leistungskonzept. Es wird in Tabelle 4.3 beschrieben und betrachtet drei Fälle.

Tabelle 4.3.: Konzept zur Leistungsregelung der P4H-Anlagen

x= eingegebener Leistungswert		
e=x-9 kW		
<b>1. Fall</b>	<b>2. Fall</b>	<b>3. Fall</b>
x <=9 kW	x > 9 kW und e < 1,2 kW	x > 9 kW und e > 1,2 kW
Leistung P4H1 = x	Leistung P4H1 = 9 kW - (1,2 kW - e)	Leistung P4H1 = 9 kW
Leistung P4h2 = 0	Leistung P4h2 = 1,2 kW	Leistung P4H2 = x - 9 kW

Es sieht vor, bis 9 kW nur eine der Anlagen zu betreiben. Liegt die eingegebene Leistung über 9 kW und die Differenz zwischen Eingabe und 9 kW beträgt weniger als 1,2 kW, dann wird die zweite Anlage mit der Mindestleistung gefahren, während die erste Anlage die restliche Leistung abdeckt. Übersteigt die Leistungseingabe einen Wert von 10,2 kW und damit die Differenz 1,2 kW, dann liefert die erste P4H dauerhaft ihre maximal Leistung mit 9 kW und der Rest wird über die zweite Anlage bereitgestellt.

### 4.3. Erzeuger

Die Steuerung des Erzeugers hat folgende Anforderungen:

- Erfassung von Temperaturen, Drücken und der Stellung des Stellantriebs
- Auslesen der WMZ
- Übergabe der WMZ-Daten am Heizlüfter an die SPS der Rückkühlung
- Übertragung der Daten zwischen den SPS mittels Modbus Protokoll
- Kommunikation mit den P4H-Anlagen
- Visualisierung aller Daten des Versuchsstandes

Zum Auslesen der WMZ wird ein Programm zur Wandlung von M-Bus auf Modbus benötigt [vgl. 27] . Dieses kann in CoDeSys geladen werden. Es enthält eine eigene Visualisierung und speichert die gelesenen Werte in Modbus Arrays. Die Werte sollen in die im Rahmen der Bachelorarbeit erstellten Gesamtvisualisierung eingefügt und das Programm für die eigene Anwendung variiert werden.

## Regelung elektrische Last

Um wie in Anwendungsfall 1a vorgesehen eine elektrische Last vorgeben zu können, muss die Leistungsregelung der P4H-Anlagen genutzt werden. In der Regelung des Herstellers ist allerdings nur eine gemeinsame Regelung von Vorlauftemperatur und Leistung vorgesehen, wobei die Leistung der Temperatur untergeordnet ist und sich verändert, um die Temperatur anzupassen. In der Visualisierung ist der Wert *LeistungsbegrenzungVLSoll + Hysterese* dargestellt. Dieser gibt an, in welchem Bereich Abweichungen des Temperaturwertes erlaubt sind. Wird der Wert stark erhöht, dann spielt die Temperaturregelung eine geringere Rolle. Es ist zu prüfen, ob dies eine Stabilisierung der Leistung ermöglicht.

## Regelung elektrische Last mit Vorlauftemperaturprofil

Auch für den Fall 1b kann die Regelung des Herstellers genutzt werden, allerdings hat wieder die Konstanthaltung der Temperatur die höhere Priorität. Falls die Regelung des Herstellers keine verlässliche Vorlauftemperatur liefert, soll diese mit Hilfe einer Vorlaufbeimischung nachgeregelt werden. Dafür wird die Vorlauftemperatur an der P4H-Anlage um einige °C über den Sollwert erhöht. Über ein Dreiwegeventil kann dann mit einem PID-Regler ein Teil des Rücklaufs dem Vorlauf beigemischt werden, sodass eine konstante Solltemperatur entsteht. Über die Steuerung des Stellantrieb kann die Öffnung des Ventils bestimmt werden. Wie groß die Erhöhung des Sollwertes sein sollte, kann praktisch erprobt werden.

## 4.4. Wärmeübergabestation

An die SPS der WÜST sollen lediglich die Temperatur und Drucksensoren angeschlossen und die Werte dargestellt werden. Die Anbindung der Wärmeübergabestation ist momentan nicht möglich. Um die WÜST in Zukunft integrieren zu können, ist es sinnvoll, diese direkt mit der SPS des WÜST-Moduls zu verbinden. Damit bleibt die Autonomie der Steuerung erhalten. Werte, die im Betrieb des Teststandes am Erzeuger-Modul benötigt werden, können dorthin übertragen werden. Auch wenn dies einen weiteren Übertragungspfad erfordert und bei einer Änderung an zwei Stellen das Programm verändert werden muss, erscheint es wichtiger die Module unabhängig voneinander steuern zu können.

## 4.5. Rückkühlung

Die Steuerung der Rückkühlung soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Erfassung von Temperaturen, Drücken und der Stellung des Stellantriebs
- Steuerung der Pumpe, des Heizlüfters und des Stellantriebs
- Regelung der thermischen Leistung und der Rücklauftemperatur

### Regelung thermische Leistung

Um den Anwendungsfall 2a abzudecken, muss die thermische Leistung am Heizlüfter geregelt werden. Die thermische Leistung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Sie ist nach Formel 2.6 ( $\dot{Q} = \dot{V} * c_w * \rho * \Delta T$ ) abhängig von dem Volumenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf am Heizlüfter.

Bild 4.2 stellt die Leistungsregelung schematisch dar. Für die Regelung der Leistung soll eine Veränderung des Volumenstroms genutzt werden. Dies erfolgt über Regelung der Pumpleistung. Es wird angenommen, dass die Temperaturdifferenz währenddessen konstant bleiben. Außerdem wird der Heizlüfter auf Volllast gestellt.

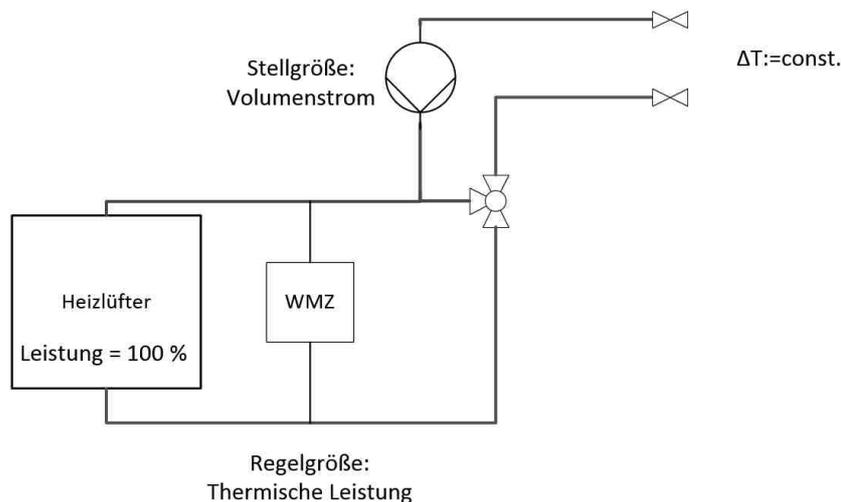


Abbildung 4.2.: Veranschaulichung der Leistungsregelung

Für die Regelung bietet sich ein PID-Regler an. Dieser berücksichtigt nicht nur die aktuelle Regelabweichung, sondern auch die Vergangenheit und die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung. Es könnte auch ein PI-Regler genutzt werden, da diese schnell einen guten Regelgrößenverlauf liefern. Bei diesen Reglern bleibt aber immer eine Regelabweichung.

Ein Baustein für einen PID-Regler findet sich in der CoDeSys Bibliothek.

Geregelt werden soll die vom WMZ gemessene thermische Leistung. Diese wird von der SPS des Erzeugers übermittelt. Die Parameter  $K_p$ ,  $T_n$  und  $T_v$  des Reglers müssen für die Nutzung des Bausteins bestimmt werden. Dabei wird nach dem in den Grundlagen beschriebenen Verfahren vorgegangen und ein Sprung auf die Stellgröße, den Volumenstrom, gegeben. Nachdem die Sprungantwort der thermischen Leistung ausgewertet wurde, können Parameter bestimmt und dem Baustein zugewiesen werden.

## Regelung Rücklauftemperatur

Für Fall 2b soll zusätzlich die Rücklauftemperatur vorgegeben werden können. Bild 4.3 stellt die Temperaturregelung dar. Die Rücklauftemperatur soll über eine Rücklaufbeimischung erhöht werden.

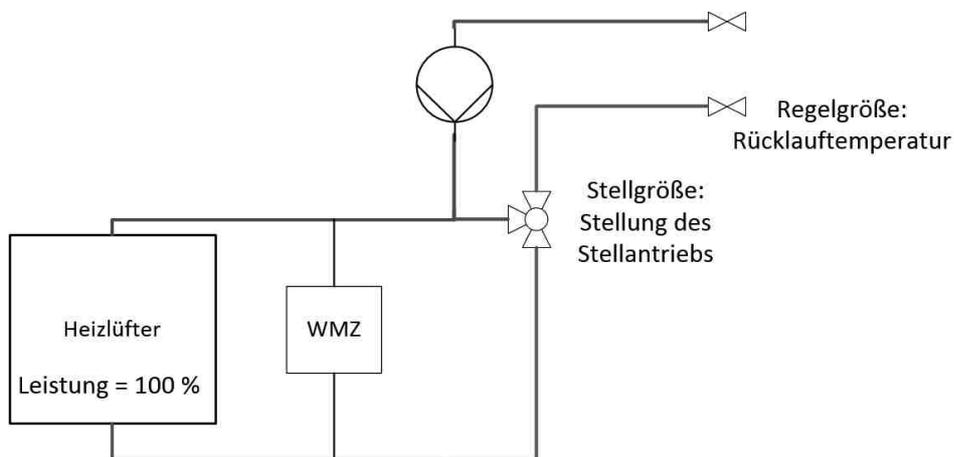


Abbildung 4.3.: Veranschaulichung der Temperaturregelung

Ähnlich wie bei der Vorlaufbeimischung wird über die Regelung des Stellantriebs ein Dreiwegeventil geöffnet oder geschlossen und damit das Mischungsverhältnis von Vor- und Rücklauf bestimmt. Auch für diese Regelung soll ein PID-Regler verwendet werden. Die Parameter werden erneut aus der Sprungantwort der Ausgangsgröße bestimmt. Die Stellgröße ist die Stellung des Stellantriebs.

### **Regelung thermische Leistung mit Rücklauftemperaturprofil**

Wenn beide Größen in Fall 2b zusammen geregelt werden sollen, dann beeinflussen sie sich gegenseitig. Sobald die Temperatur geregelt wird, verändert sich der Volumenstrom am Heizlüfter und damit auch die thermische Leistung. Wird die Leistung geregelt, dann verändert sich der gesamte Volumenstrom, jedoch hat dies keinen Einfluss auf die Temperatur, da das Verhältnis zwischen Vorlauf und Rücklauf durch die Stellung des Stellantriebes vorgegeben ist und sich nicht verändert.

Allerdings kann sich die Rücklauftemperatur erhöhen, wenn die Leistung des Heizlüfters nach Erhöhen des Volumenstroms nicht mehr ausreichend ist, um diesen auf die gleiche Temperatur abzukühlen. Im praktischen Test muss geprüft werden, wie stark sich die beiden Regelungen beeinflussen. Es ist davon auszugehen, dass die Temperaturregelung einen größeren Einfluss auf die Leistung hat als umgekehrt.

### **Regelung der thermischen Leistung mit Rücklauf- und Vorlauftemperaturprofil**

Der Anwendungsfall 3 umfasst die Regelung von Vorlauf- und Rücklauftemperatur in Kombination mit einer Regelung der thermischen Last. Die benötigten Regelemente wurden bereits in den vorherigen Abschnitten genannt und können für diesen Fall kombiniert werden.

# 5. Umsetzung des Hardwarekonzeptes

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Hardwarekonzeptes beschrieben. Die Anbindung der Komponenten wird getrennt beschrieben. Außerdem werden Probleme, Lösungsansätze und Abweichungen von dem ursprünglichen Konzept erläutert.

## 5.1. SPS

In diesem Unterkapitel wird die grundsätzliche Verkabelung der WAGO Hardware erläutert und alle benutzten Klemmen werden aufgeführt. Details zu den Klemmen und Controllern finden sich in den Datenblättern.

Die SPS muss mit dem Netzteil verbunden werden. Die Controller unterscheiden sich zwar in einigen Punkten, der für die Verkabelung relevante Aufbau ist aber bei allen Controllern gleich. In Bild 5.1 ist die Verkabelung zu sehen. Nr. 5 auf dem Bild zeigt auf die Kontakte an denen die Versorgungsspannung von 24 V angeschlossen wird. Außerdem muss eine Brücke zwischen 24 V und + und 0 V und - gelegt werden. Damit werden auch die nachfolgenden Klemmen mit der Betriebsspannung versorgt.

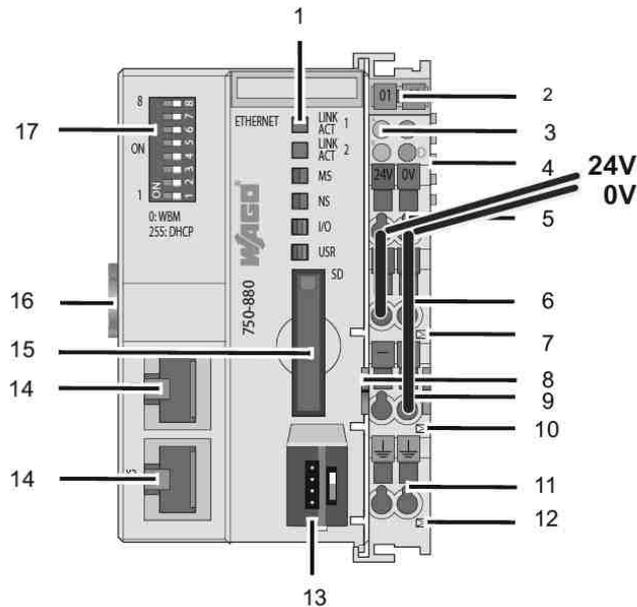
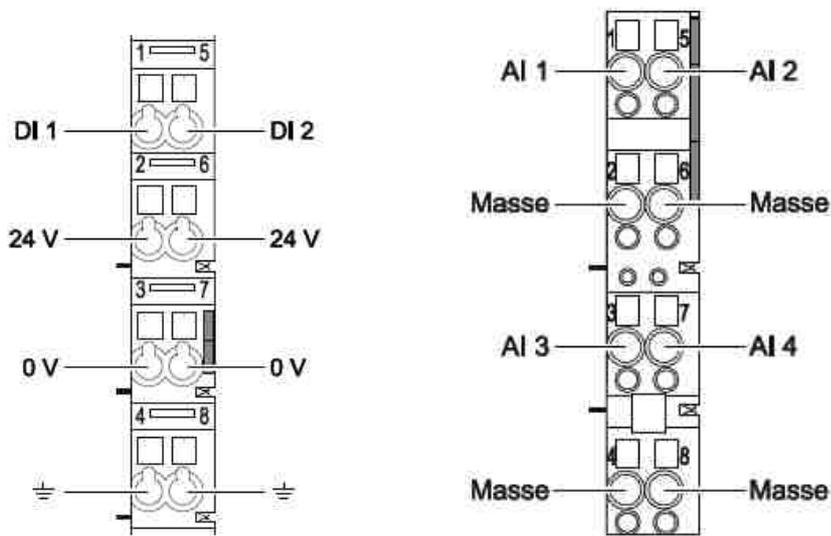


Abbildung 5.1.: Ansicht des WAGO Feldbuscontrollers [28, S.12]

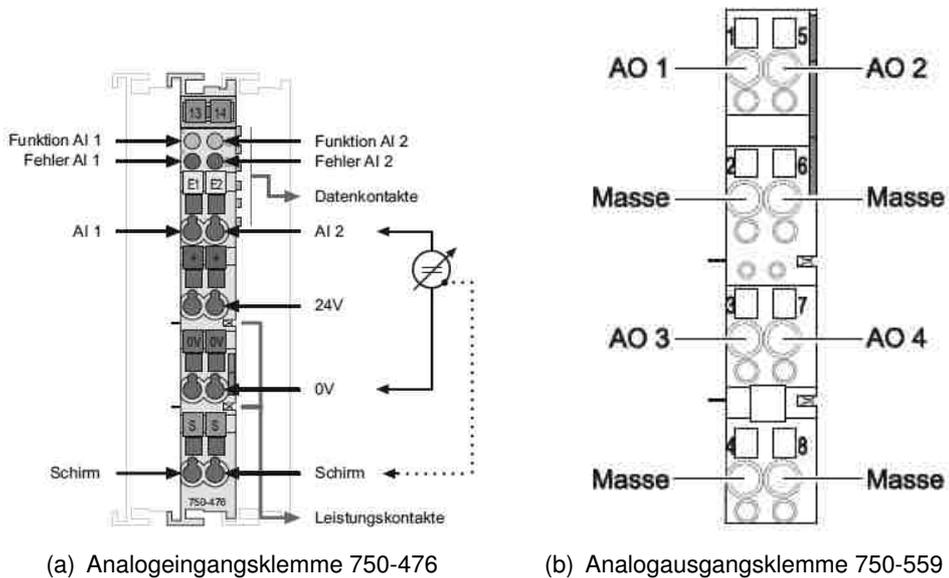
Bei Nr. 14 auf dem Bild handelt es sich um zwei RJ-45 Anschlüsse über die die SPS mit dem Switch verbunden werden kann. Die anderen Nummern spielen in diesem Fall keine Rolle. Bild 5.2 zeigt den schematischen Aufbau der Digitaleingangsklemme 750-411 und der Analogeneingangsklemme 750-455. Die digitale Klemme wird nur zur Spannungsversorgung der angeschlossenen Komponenten genutzt, da am Controller nicht genug Platz für alle Drähte ist. Bild 5.3 zeigt die die Analogeingangsklemme 750-476 und die Analogausgangsklemme 753-559. Die Verkabelung der Sensoren mit den Klemmen wird in den folgenden Unterkapitel beschrieben.



(a) Digitaleingangsklemme 750-411

(b) Analogeingangsklemme 750-455

Abbildung 5.2.: Schematischer Aufbau der verwendeten Klemmen 750-411 und 750-455 [24, S.17][25, S.17]



(a) Analogeingangsklemme 750-476

(b) Analogausgangsklemme 750-559

Abbildung 5.3.: Schematischer Aufbau der verwendeten Klemmen 750-476 und 750-559 [23, S.7][26, S.18]

## 5.2. Wärmemengenzähler

Der Pegelwandler wird an die serielle Schnittstelle des SPS-Controllers angeschlossen. Es wird der Pegelwandler M-Bus 10 von Techbase genutzt. In Bild 5.4 sind die Anschlüsse des Wandlers zu sehen.

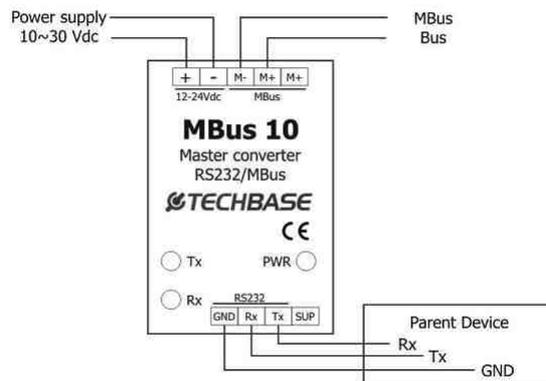


Abbildung 5.4.: Anschlüsse des Pegelwandlers [8]

Als Betriebsspannung werden 24 V von der SPS angelegt. Die WMZ werden parallel verdrahtet und mit dem Eingang M- und M+ verbunden. Zur Verdrahtung der WMZ der Rückkühlung mit den WMZ des Erzeugers wird eine RJ-11 Steckverbindung genutzt. Dadurch kann der WMZ der Rückkühlung einfach angeschlossen werden. Um den Pegelwandler über RS232 mit dem Controller zu verbinden muss die Belegung des RS232 Steckers in Bild 5.5 berücksichtigt werden. An die drei benötigten Pins des Steckers werden Kabel gelötet und diese mit dem  $R_x$ ,  $T_x$  und  $GND$  Ausgang des Pegelwandlers verbunden.

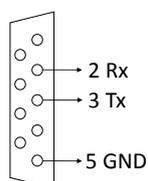


Abbildung 5.5.: Belegung des RS232 Steckers [Vgl. 16, S.478]



## 5.3. Temperatursensoren

Zur Umwandlung des Widerstandes in ein Stromeingangssignal wird die Schaltung nach dem Schaltplan in Bild 3.4 mit SMD IC's realisiert. Während der Umsetzung sind mehrere Fehler aufgetreten. Deswegen wird im folgenden in chronologischer Reihenfolge die Umsetzung und die Fehlerbehebung aufgeführt.

### Test und Ergebnis der ersten Schaltung

Im Labor wird der erste IC getestet. Zum Test wird an den Eingang des IC's ein Wert angelegt. Liegt eine Versorgungsspannung von 24 V und eine Eingangsspannung von 10 V an, dann fließt am Ausgang ein Strom von 20 mA. Liegt keine Eingangsspannung an, dann fließt am Ausgang ein Strom von 4 mA.

### Schlussfolgerung aus dem Test der ersten Schaltung

Der Grundaufbau der Schaltung funktioniert wie gewünscht. Wenn der PT1000 angeschlossen ist, lässt sich aus dem Strom, der an der Klemme anliegt, mit Hilfe der Formel 5.1 der Spannungsabfall am PT1000 berechnen.

$$U = (I - 4mA) * \frac{10V}{16mA} \quad (5.1)$$

Der Widerstandswert des PT1000 errechnet sich aus Formel 3.1, wenn diese nach dem PT1000 umgestellt wird und für den Widerstand  $R$  ein Wert von  $1870 \Omega$  eingesetzt wird.

### Test aller 6 SMD-Schaltungen

Die Schaltungen für alle sechs Temperatursensoren werden gelötet und in Betrieb genommen. Sie werden an die 24 V Spannungsversorgung der SPS angeschlossen und der PT1000 wird angeklemmt.

## Ergebnis aus dem Test der SMD-Schaltungen

In Kombination mit dem PT1000 und angeschlossen an die SPS treten Probleme auf. Der aus dem gemessenen Strom berechnete Widerstand des PT1000 weicht bei drei von sechs Schaltungen stark von dem Wert ab, der mit einem Multimeter am PT1000 gemessen werden kann. Es werden bei einer Raumtemperatur von etwa 25 °C Widerstandswerte von rund 1200  $\Omega$  gemessen. Das entspricht nach Formel 2.4 Temperaturen von über 50 °C. Die restlichen Schaltungen liefern Werte außerhalb des Messbereichs.

## Erste Schlussfolgerung SMD-Schaltungen

Da drei Schaltungen ähnliche Werte liefern, ist von einer systematischen Messabweichung auszugehen. Die Schaltung haben im Laborbetrieb ohne PT1000 und den dazugehörigen Spannungsteiler funktioniert, deswegen kann vermutet werden, dass der grundsätzliche Aufbau der restlichen Schaltung richtig ist. Der Fehler könnte bei dem Spannungsteiler liegen, da dieser im Labor nicht getestet wurde. Da die Werte der restlichen Schaltungen außerhalb des Messbereichs sind, liegt vermutlich ein Fehler in der Umsetzung dieser Schaltungen vor. Als erstes sollte der systematische Fehler gefunden werden, dann können die restlichen Schaltungen überprüft werden.

## Überprüfung der ersten Schlussfolgerung SMD-Schaltungen

Die Berechnungen für den Widerstand des Spannungsteilers erweisen sich bei einer Überprüfung als richtig, ebenso wie die Berechnungen zur Bestimmung des Widerstandes des PT1000. Die Spannung am Spannungsteiler wird im laufenden Betrieb gemessen. Außerdem wird überprüft welche Betriebsspannung von Seiten der SPS anliegt. Tabelle 5.1 zeigt die gemessene und die theoretische Betriebsspannung.

Tabelle 5.1.: Vergleich der gemessenen und theoretischen Betriebsspannung

$U_b$ theoretisch / V	$U_b$ gemessen / V
24	24,2

Dabei stellt sich heraus, dass die SPS eine erhöhte Spannung liefert. Tabelle 5.2 zeigt den gemessenen Spannungsabfall am PT1000 und den Spannungsabfall, der sich bei

Raumtemperatur von 25 °C theoretisch ergibt. Der 1870 Ω Widerstand des Spannungsteilers besitzt eine Toleranz von ± 1 %. Die Tabelle 5.1 zeigt außerdem die minimale und die maximale Spannung am PT1000 die sich dadurch theoretisch ergeben kann.

Tabelle 5.2.: Vergleich der theoretischen Spannung am PT1000 bei unterschiedlichen Betriebsspannungen

	$U_{PT1000}$ theoretisch ( $U_b = 24V$ ) / V	$U_{PT1000}$ theoretisch ( $U_b = 24,2V$ ) / V
Minimum	8,82	8,89
ohne Toleranz	8,88	8,95
Maximum	8,93	9,01

Die gemessene Spannung am PT1000 beträgt 8,99 V. Diese erhöhte Spannung ist eine Folge der erhöhten Betriebsspannung und einer Ungenauigkeit der Widerstände. Mit dem gemessenen Spannungsabfall würde nach Formel 5.2 von einem Widerstand von 1120,01 Ω ausgegangen werden.

$$R_{PT1000} = \frac{1870\Omega * 8,99V}{24V - 8,99V} = 1120,01\Omega \quad (5.2)$$

Basierend auf Formel 2.4 entspricht das einer Temperatur von rund 31 °C. Das begründet einen kleinen Teil der Abweichungen bei der Temperaturmessung, jedoch nicht das volle Ausmaß.

## Zweite Schlussfolgerung SMD-Schaltungen

Wenn die Spannung am Eingang des IC's nicht so stark erhöht ist, dass sie die Abweichung des Stroms am Ausgang erklärt, dann muss der Fehler innerhalb des IC's auftreten.

## Überprüfung der zweiten Schlussfolgerung SMD-Schaltungen

Dem Datenblatt des IC's [vgl. 1] kann entnommen werden, dass die Ungenauigkeit der Wandlung bei hohen Werten nahe der 10 V steigt. Die Spannungen am PT1000 liegen bei niedrigen Temperaturen bereits bei rund 9 V.

## Maßnahmen zur Vermeidung der systematischen Fehler

Der Spannungsteiler soll anders dimensioniert werden, sodass niedrigere Spannungen gemessen werden. Gleichzeitig soll das Problem der nicht konstanten Betriebsspannung gelöst werden. Der IC liefert an Pin 7 eine konstante Referenzspannung von 10 V. Diese soll an Stelle der 24 V genutzt werden. Der Spannungsteiler muss dann nicht verändert werden, da mit einer Betriebsspannung von 10 V und  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$   $U_{PT1000}$  bei etwa 3,7 V liegt. Der neue Schaltungsaufbau ist in Bild 5.7 zu sehen.

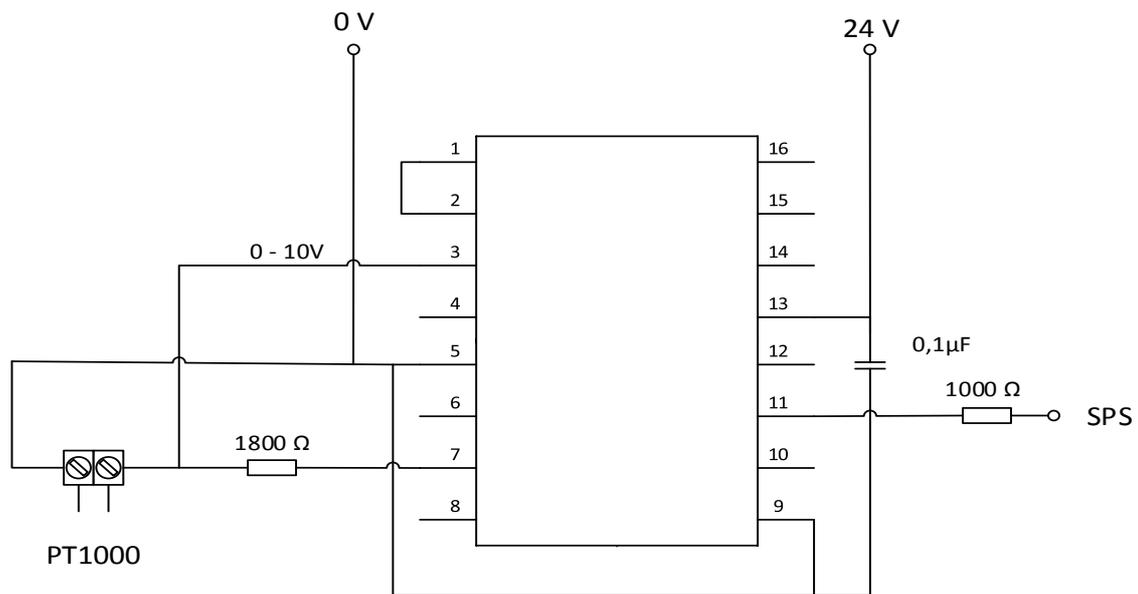


Abbildung 5.7.: Veränderter Schaltungsaufbau zur Anbindung des PT1000 an die Stromeingangsklemme

## Test mit verändertem Schaltungsaufbau

Die drei Schaltungen werden nachdem der Schaltungsaufbau verändert wurde wieder an die SPS angeschlossen und der Strom gemessen.

## **Ergebnis des veränderten Schaltungsaufbaus**

Nachdem die Schaltungen dementsprechend verändert wurden, liegen die gemessenen Ströme in einem plausiblen Bereich. Auf eine bleibende Abweichungen bei der Temperaturmessung wird im Kapitel 7.1 eingegangen.

## **Test zur Fehlersuche an den restlichen 3 Schaltungen**

Nun bleiben noch die drei Schaltungen, deren Werte außerhalb des Messbereichs liegen. Folgende Überprüfungen werden zur Fehlersuche genutzt:

- Schaltungsaufbau mit dem Schaltplan abgleichen
- Kontaktstellen mit dem Multimeter prüfen
- Lötstellen an den Beinen der IC's prüfen
- Auf Kurzschlüsse prüfen

## **Ergebnis der Fehlersuche an den 3 Schaltungen**

Fehler im Schaltungsaufbau bestehen nicht. Jedoch können Fehler an Lötstellen festgestellt und behoben werden. Es treten trotzdem weiterhin Fehler auf. Zusätzlich funktioniert eine weitere Schaltung nicht mehr. Entweder liefern die IC's am Ausgang Ströme über 20 mA oder die Werte der Referenzspannung schwanken stark und übersteigen 10 V deutlich.

## **Schlussfolgerung aus der Fehlersuche**

Es ist davon auszugehen, dass die IC's defekt sind.

## **Maßnahme zum Erstellen von insgesamt 6 funktionierenden Schaltungen**

Die defekten IC's sollen durch neue ersetzt werden. Um den Defekt eines der neuen IC's zu vermeiden, werden THT IC's bestellt. Bei diesen ist die Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu SMD IC's geringer, dass es zu Problemen an den Lötstellen kommt. Außerdem können THT IC's auf einen Sockel gesteckt werden. Nur der Sockel muss angelötet werden und nicht der IC. Dadurch kann vermieden werden, dass dieser beim Löten zu hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Es könnte außerdem sein, dass beim Messen mit dem Multimeter Ströme fließen, die zur Zerstörung des IC's führen. Es wird zuerst nur eine Schaltung erstellt und auf mangelhafte Löt- und Kontaktstellen sowie Kurzschlüsse geprüft. Danach wird der IC in den Sockel gesetzt. Außerdem wird der  $1870\ \Omega$  Widerstand durch einen Widerstand von  $1800\ \Omega$  ersetzt, da es sich bei diesem um einen Standardwiderstand handelt.

## **Tests und Ergebnisse zum Erstellen von 6 THT-Schaltungen**

Die Schaltung wird auf mangelhafte Löt- und Kontaktstellen sowie Kurzschlüsse geprüft. Alle Löt- und Kontaktstellen sind in Ordnung und es gibt keine Kurzschlüsse. Der IC wird eingesetzt und die Schaltung an die Spannungsversorgung angeschlossen. Die Schaltung funktioniert einwandfrei. Es können daraufhin auch die restlichen Schaltungen nach dem selben Schema umgesetzt werden. Es werden alle Schaltungen erneuert, damit eine Vergleichbarkeit der Temperaturen gewährleistet ist. Alle sechs Schaltungen funktionieren. Die Wandlung des Widerstandes in ein Stromeingangssignal wurde erfolgreich umgesetzt und die Schaltung wird in Bild 5.8 dargestellt.

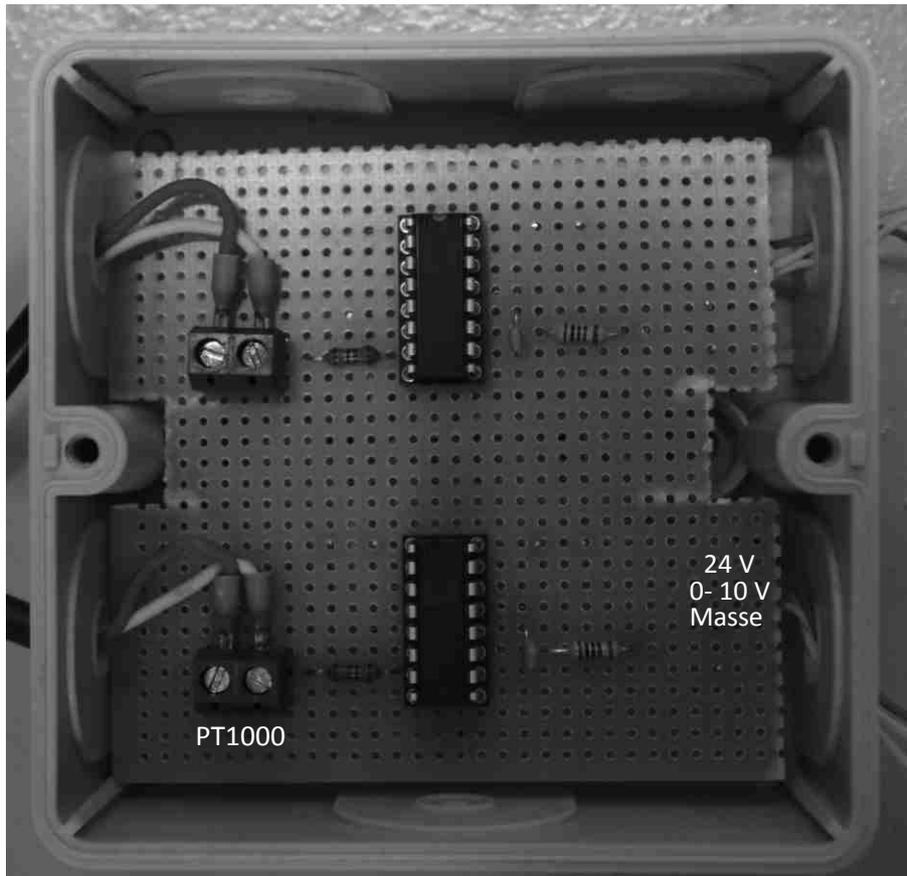


Abbildung 5.8.: THT-Schaltung zur Temperaturmessung

## 5.4. Drucksensoren

Die Drucksensoren QBE2003-P10 von Siemens arbeiten in einem Druckbereich von 0-1,0 MPa, was 0-10 bar entspricht. Sie liefern ein Ausgangssignal von 0-10 V. Bild 5.9 stellt die Klemme des Drucksensors dar.

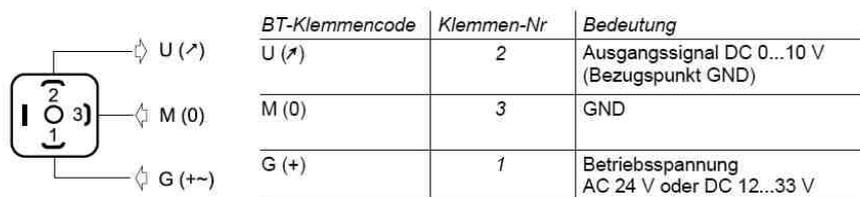


Abbildung 5.9.: Anschlussplan der Drucksensoren [20, S.5]

In Bild 5.10 ist die Verbindung mit der SPS-Klemme 750-476 zu sehen. Bild 5.11 zeigt die Umsetzung.

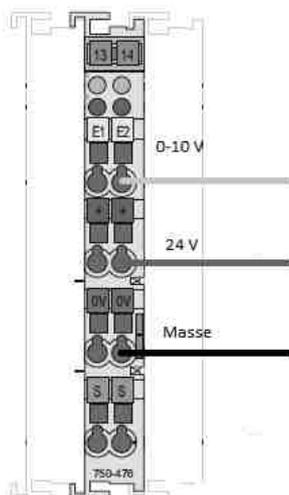
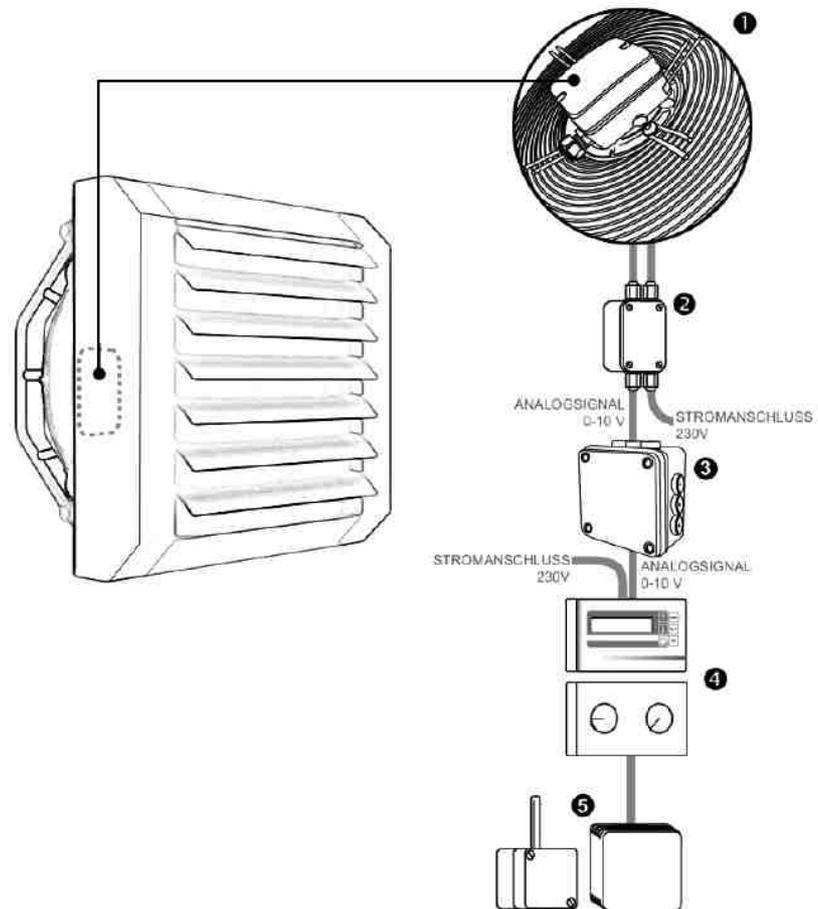


Abbildung 5.10.: Verkabelung des Drucksensors mit der SPS-Klemme [Vgl. 23, S.17]





- ❶ DSS2e - angebauter spannungsgesteuerter Geschwindigkeitsregler
- ❷ PM - Verbindungsbox
- ❸ SV - Signalverteiler zum Anschluss mehrerer Geräte an eine Steuerung (Zubehör)
- ❹ MRLCD - Steuerung digital (Zubehör)  
MR - Steuerung analog (Zubehör)
- ❺ TF - externer Temperatursfühler (Zubehör), erhältlich in Schutzart IP 20 oder IP 65

Abbildung 5.12.: Aufstellung der Steuerelemente des Heizlüfters [6, S.10]

Ein externer Temperatursfühler (Nr.5) wurde nicht verbaut. Die Steuerung wird abgeklemmt und der Heizlüfter stattdessen wie in Bild 5.13 mit der Klemme 750-559 verkabelt. Der Heizlüfter kann über eine Spannung zwischen 0-10 V angesteuert werden.



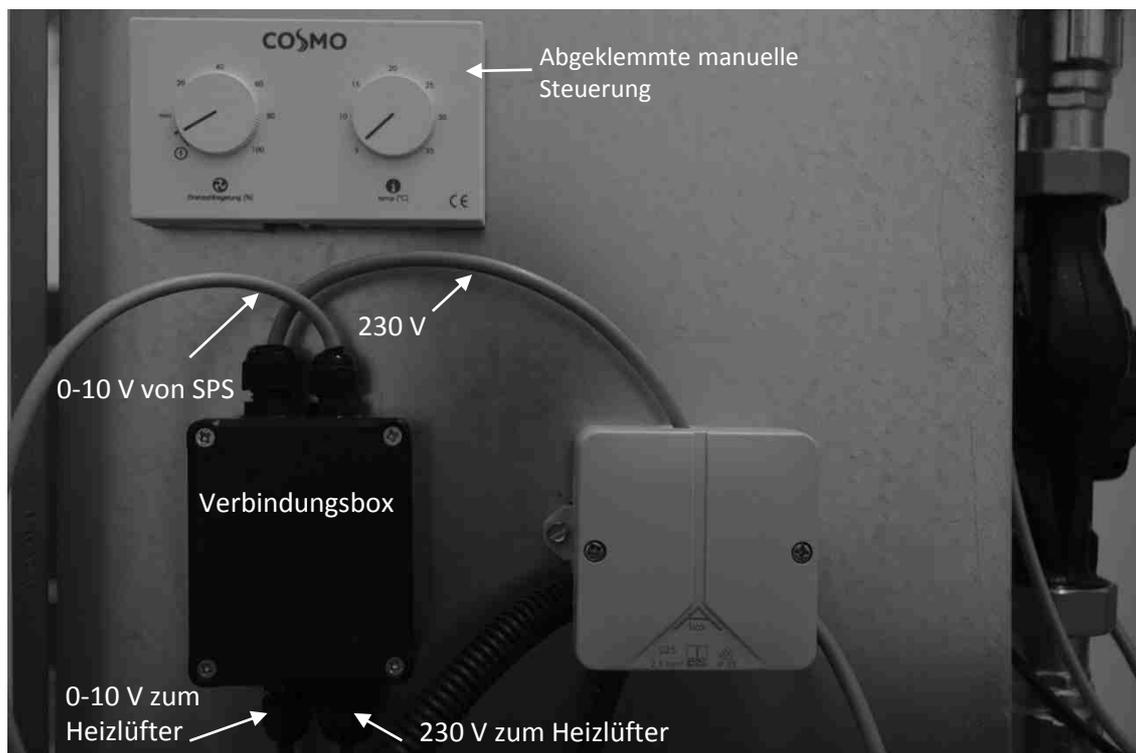


Abbildung 5.15.: Elektrische Verschaltung des Heizlüfters

In Kapitel 5.7 auf Bild 5.19 ist die Verkabelung des Heizlüfters, der Pumpe und des Stellantriebes zu sehen.

## 5.6. Pumpe

Die Pumpe Wilo-Stratos PARA-Z, die in der Rückkühlung verbaut ist, kann ebenfalls über ein Signal zwischen 0-10 V gesteuert werden. In Bild 5.16 ist das 4-Adrige Kabel der Pumpe und der Anschluss an die SPS-Klemme 750-559 zu sehen. Die braune Ader liegt auf Masse und an der weißen Ader liegt eine Spannung zwischen 0 und 10 V an. An den beiden anderen Adern befinden sich Kontakte, die im Normalzustand geschlossen sind und bei dem Anlegen einer Spannung geöffnet werden. Diese dienen der Störungsmeldung und sind in diesem Fall nicht relevant. [Vgl. 31]

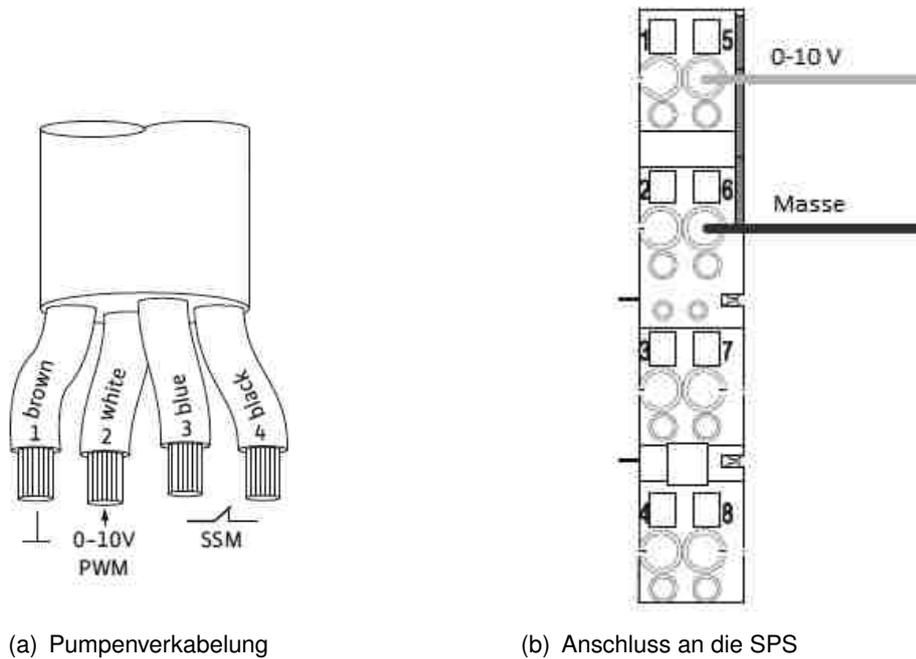


Abbildung 5.16.: Verkabelung der Pumpe mit der SPS [31, S.17] [Vgl. 26, S.17]

## 5.7. Stellantrieb

Auch der Stellantrieb wird mit 0-10 V angesteuert und liefert eine Stellungsrückgabe in Form von 0-10 V. In Bild 5.17 ist die Kabelbelegung der Anschlussklemme des Stellantriebs zu sehen.

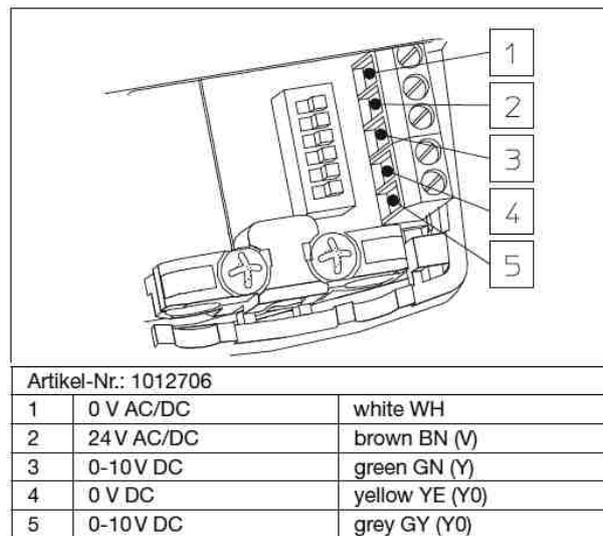


Abbildung 5.17.: Kabelbelegung der Anschlussklemme [Vgl. 19, S.1]

Der Anschluss an die SPS-Eingangsklemme 750-476 und Ausgangsklemme 750-559 wird in Bild 5.18 dargestellt. Die Rückmeldung des Stellventils wird vorerst nicht erfasst, da zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine Klemme zur Verfügung stand. Für die Regelung der Rücklauftemperatur am Rückkühlungs-Modul ist die Stellungsrückgabe wichtig, deswegen wird am Erzeuger-Modul darauf verzichtet.

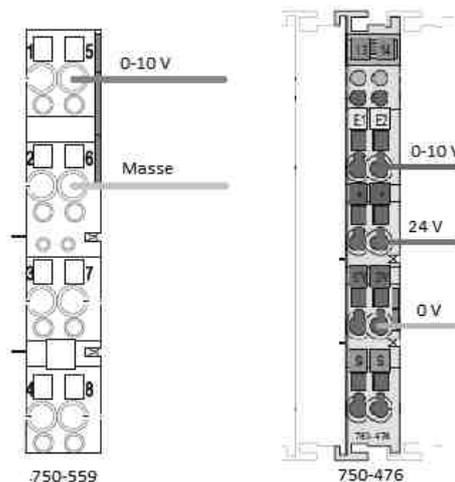


Abbildung 5.18.: Verkabelung des Stellantriebs mit der SPS [Vgl. 26, S.18][Vgl. 23, S.7]

Bild 5.19 zeigt die Umsetzung der Verkabelung der Komponenten aus den vorherigen Kapiteln.

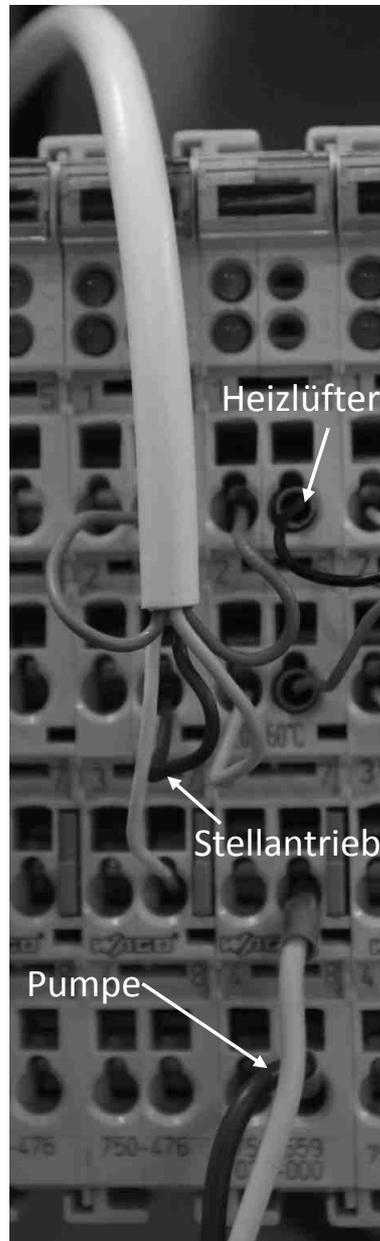


Abbildung 5.19.: Verkabelung des Heizlüfters, der Pumpe und des Stellantriebes

## 6. Umsetzung des Steuerungs- und Regelungskonzeptes

Die Umsetzung des Steuerungs- und Regelungskonzeptes erfolgt über die Programmierung der SPS. Für diese wird das Programm CoDeSys genutzt. Um die Programmierung zu testen, wird zunächst ein Modul unabhängig von den anderen betrieben. Dafür eignet sich am besten die Rückkühlung. Über die Anschlusspunkte kann der Vorlauf mit dem Rücklauf verbunden werden, sodass die Rückkühlung hydraulisch kurzgeschlossen ist. Danach werden die Module verbunden und die weitere Regelung implementiert.

Die Kapitel enthalten Auszüge aus der Programmierung. Der vollständige Code befindet sich auf der beigefügten CD. Bild 6.1 zeigt die im Rahmen der Bachelorarbeit erstellte Visualisierung des Teststandes. Die Temperatur- und Druckwerte haben für den Vorlauf (rot) und den Rücklauf (blau) eine Nummerierung, die in farbigen Kreisen über den Messwerten platziert ist. Auf die Visualisierung wird in den folgenden Kapitel weiter eingegangen.

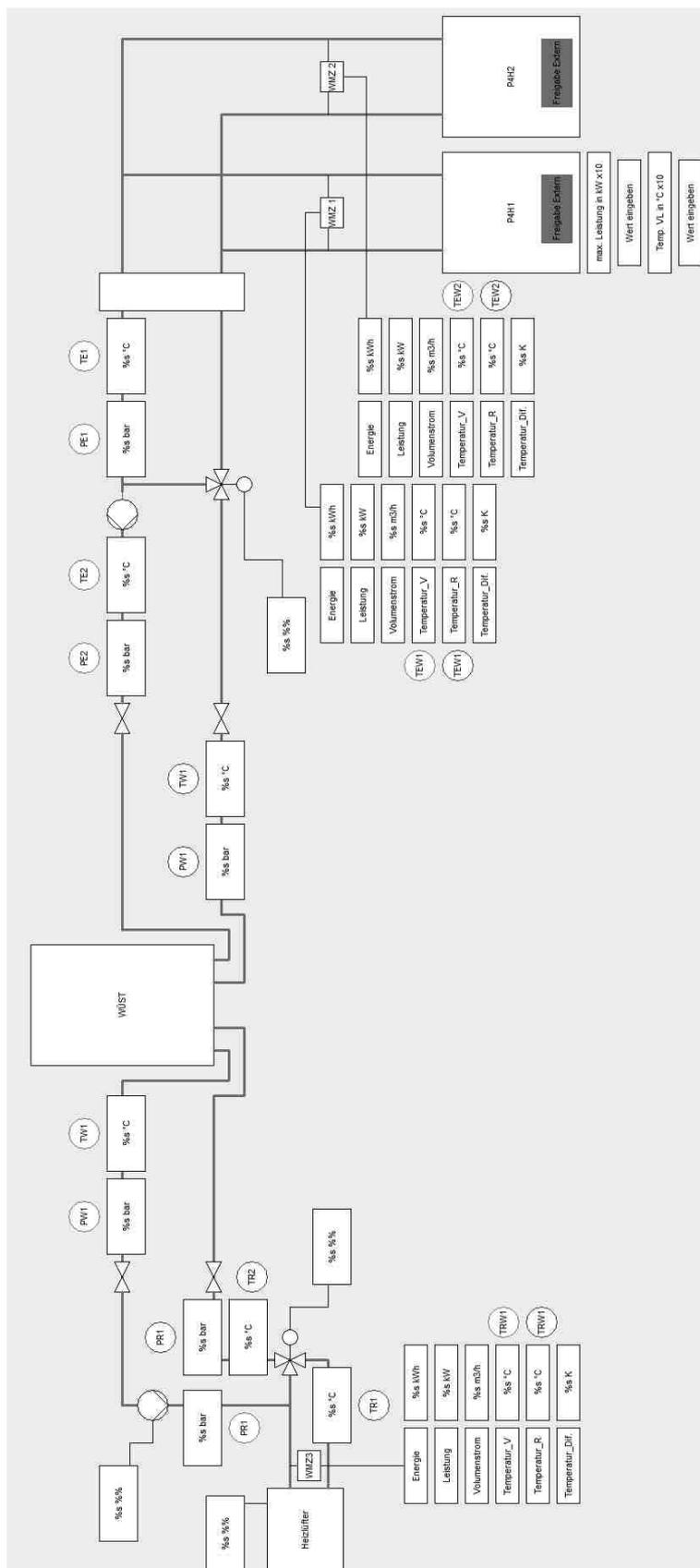


Abbildung 6.1.: Visualisierung des Teststandes

Um mit CoDeSys auf eine SPS zugreifen zu können, muss zuerst in den Zielsystem Einstellungen des Programms ein WAGO Controller ausgewählt werden und unter Kommunikationsparameter eine IP-Adresse der SPS definiert werden. Damit die Steuerung unter dieser IP Adresse auch zu erreichen ist, kann mit Hilfe eines speziellen Kabels von WAGO auf die SPS zugegriffen und Einstellungen der SPS geändert werden.

Beim Erstellen eines neuen Programms in CoDeSys wird außerdem eine Programmiersprache festgelegt. Damit das Programm aufgerufen werden kann, wird eine Task mit einem Programmaufruf erstellt. Diese wurde für jedes Programm als zyklisch definiert mit einer Intervallzeit zwischen 5 und 200 ms. Um auf Klemmen der SPS zugreifen zu können, müssen diese in der Steuerungskonfiguration des Programms hinzugefügt werden. Die hinzugefügten Ein- und Ausgänge müssen mit den real existierenden Klemmen übereinstimmen. Bild 6.2 zeigt die Klemmen der WÜST-SPS und die Möglichkeiten der Zuweisung.

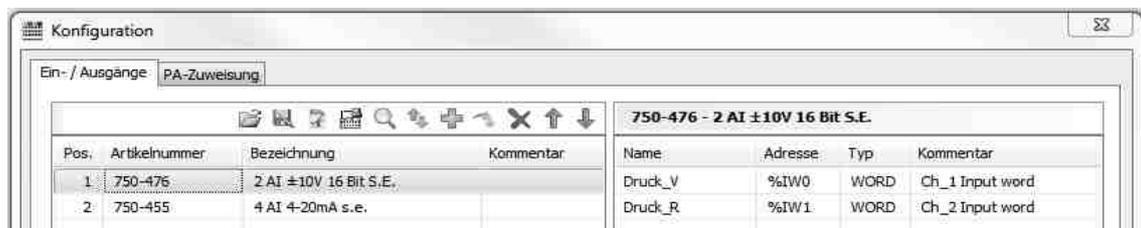


Abbildung 6.2.: Konfiguration der Ein- und Ausgangsklemmen

CoDeSys gibt die Möglichkeit den Ein- und Ausgängen Variablen zuzuordnen. Die Adressen und der Datentyp sind durch die ausgewählte Klemme gegeben. Im Hauptprogramm können die zugeordneten Variablen gelesen oder mit einem Wert belegt werden. Je nachdem welche Auflösung die Klemme hat, liegt der Zahlenwert an der Klemme in verschiedenen Bereichen. Tabelle 6.1 zeigt die Zahlenwerte der benutzten Klemmen.

Tabelle 6.1.: Zahlenwerte Ein- und Ausgangsklemmen [26, S.26] [23, S.11] [25, S.24]

Klemme	Ein-/ Ausgangssignal	Zahlenwert
750-559	0-10 V	0 - 32767
750-476	0-10 V	0 - 32767
750-455	4-20 mA	0 - 32760

## 6.1. WÜST

Die SPS der WÜST hat die Aufgabe, Temperaturen und Drücke zu erfassen. Bild 6.4 zeigt einen Ausschnitt aus der WÜST Programmierung. In Bild 6.3 sind die dazugehörigen Variablen deklariert. Die Variablen der Klemmen werden ausgelesen und die Zahlenwerte in mA bzw. in V umgerechnet. Da die Drucksensoren mit 0-10 V einen Bereich von 0-10 bar erfassen, entspricht der in V umgerechnete Wert gleichzeitig dem Druck in bar.

```

Druck_R1: REAL;    (*Druck PW1 Hilfsvariable*)
Druck_R2: REAL;    (*Druck PW1 in bar*)

I_temp_R:REAL;    (*Strom IC TW1 Hilfsvariable*)
I1_temp_R:REAL;   (*Strom IC TW1 in mA*)

U_temp_R:REAL;    (*Spannung am PT1000 TW1 in V*)

a:REAL;           (*Temperaturkoeffizient zur Temperaturberechnung*)
b:REAL;           (*Temperaturkoeffizient zur Temperaturberechnung*)

R_temp_R:REAL;    (*Widerstand am PT1000 TW1 in Ohm*)

Temperatur_R1:REAL; (*Temperatur TW1 in °C*)

```

Abbildung 6.3.: Variablen für die Programmierung

```

(*----- Messtechnik----- *)

Druck_R1:=WORD_TO_REAL(Druck_R);    (*Umwandlung des Datentyps PW2*)
Druck_R2:=(Druck_R1/32676)*10;    (* Umrechnung Zahlenwert Klemme in V *)

I_temp_R:=WORD_TO_REAL(Temperatur_R);    (*Umwandlung Datentyps TW1*)
I1_temp_R:=((I_temp_R/32760)*16)+4;    (*Umrechnung Zahlenwert Klemme in mA*)

U_temp_R:=((I1_temp_R-4)*10)/16;    (*Berechnung der Spannung am PT1000 TW1**)

R_temp_R:=(1800*U_temp_R)/(10-U_temp_R);    (*Berechnung des Widerstandes am PT1000 TW1**)

b:=-5.775*EXPT(10,-7);
a:=3.9083*EXPT(10,-3);

Temperatur_R1:=(a-SQRT(EXPT(a,2)+4*b*(1-(R_temp_R/1000))))/(2*b);    (*Berechnung der Temperatur TW1**)

```

Abbildung 6.4.: Auszug aus der Programmierung für die Messtechnik des WÜST-Moduls

Der Ausschnitt zeigt nur die Programmierung für die Drücke und Temperaturen am Rücklauf. Für den Vorlauf besteht die gleiche Programmierung.

Für die Berechnung der Temperatur ergibt sich basierend auf Formel 5.1 eine Spannung. Aus dieser kann durch Umstellen der Formel 3.1 der Widerstand des PT1000 berechnet werden. Aus dem Widerstand ergibt sich die Temperatur nach Formel 2.4.

Die Programmierung der Drücke und Temperaturen wiederholt sich bei den beiden anderen Modulen. Zur Übertragung von selbst definierten Variablen über das Modbus Protokoll müssen bestimmte Einstellungen getätigt werden, diese sind unter Kapitel 6.3 aufgeführt.

## 6.2. Rückkühlung

Die folgenden Anforderungen an die Rückkühlung wurden im Kapitel 4.5 bereits genannt:

- Erfassung von Temperaturen und Drücken und der Stellung des Stellantriebs
- Steuerung der Pumpe, des Heizlüfters und des Stellantriebs
- Regelung der thermischen Leistung und Rücklauftemperatur

Da die Umsetzung von der Erfassung von Temperaturen und Drücken bereits unter Kapitel 6.1 ausgeführt wurde, wird ausschließlich die Steuerung der Pumpe, des Heizlüfters und des Stellantriebs, sowie die Regelung der thermischen Leistung und der Rücklauftemperatur erläutert.

Bild 6.5 zeigt einen Ausschnitt aus der Programmierung über die die Daten des Stellantriebs erfasst werden und Pumpe, Heizlüfter sowie Stellantrieb angesteuert werden.

```
(*-----Messtechnik-----*)
Stellantrieb_In1:=WORD_TO_REAL(Stellantrieb_In);
Stellantrieb_In2:=(Stellantrieb_In1/32676)*100;
Stellantrieb_In_rueck:=Stellantrieb_In2;

Stellantrieb_Out1:=(Stellantrieb_Out2/100)*32676;
Stellantrieb_Out:=REAL_TO_WORD(Stellantrieb_Out1);
Stellantrieb_Out_rueck:=Stellantrieb_Out2;

Ventilator:=REAL_TO_WORD((Ventilator1/100)*32676);
Ventilator_rueck:=Ventilator1;
```

Abbildung 6.5.: Auszug aus der Programmierung für die Messtechnik des Rückkühlungs-Moduls

Die Sollwerte für Pumpe, Heizlüfter und Stellantrieb können in eine Visualisierung eingegeben werden. Bild 6.6 zeigt diese Visualisierung.

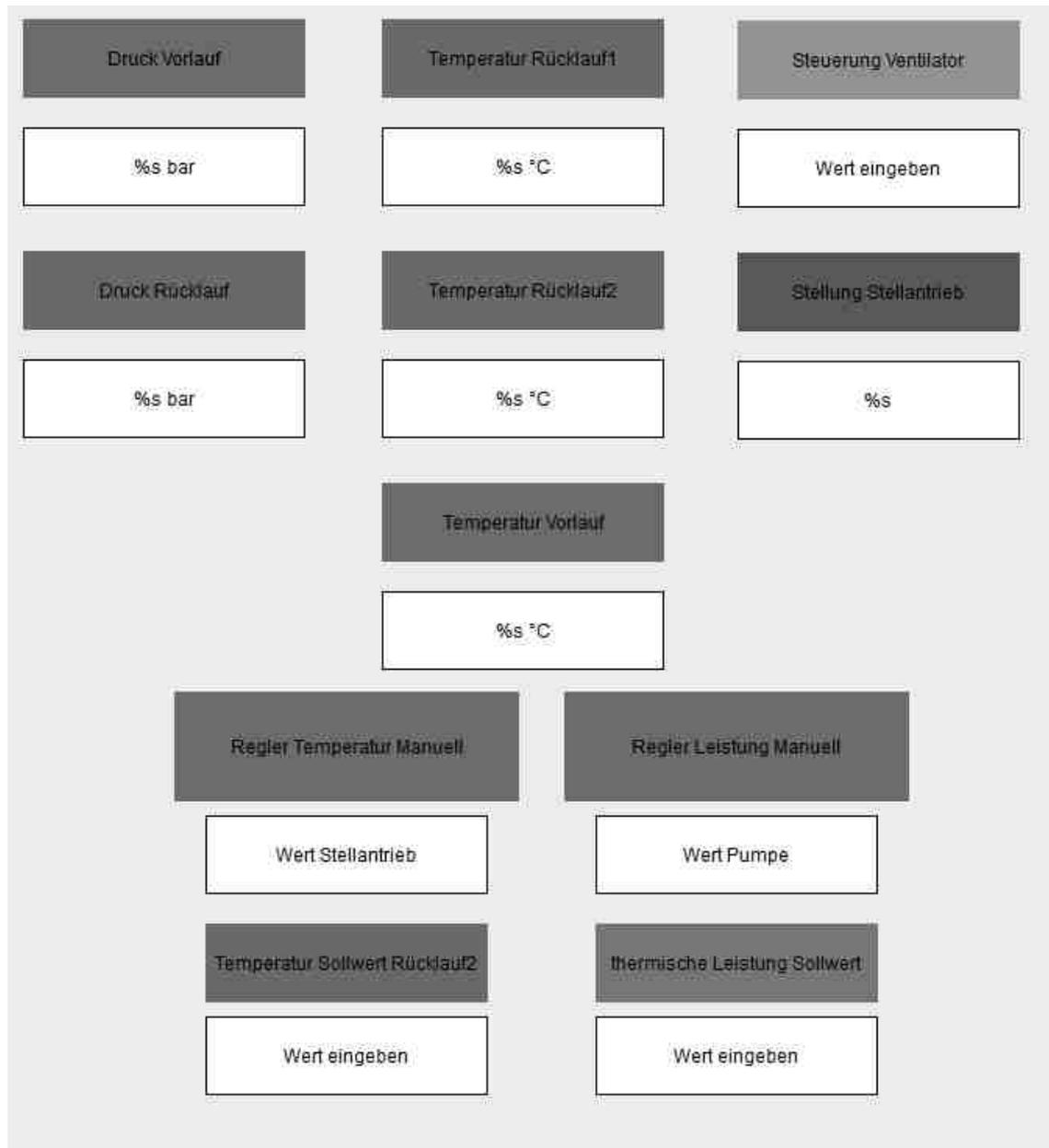


Abbildung 6.6.: Visualisierung der Rückkühlung

Die Auslesung des WMZ erfolgt über die Steuerung des Erzeugers. Die Auslesung und die Übergabe der Daten an die Rückkühlung wird in dem Kapitel 6.3 beschrieben.

## Regelung Rücklaufemperatur

Die Temperaturregelung wird nach dem in Bild 4.3 gezeigten Schema umgesetzt. Für die Temperaturregelung wird die Sprungantwort der Rücklaufemperatur ausgewertet. Zuvor wurde eine Änderung der Stellung des Stellantriebes um 100 % vorgenommen. Auf Grundlage der Kurve können die Parameter für den PID-Regler festgelegt werden. In Bild 6.7 ist die Auswertung zu sehen.

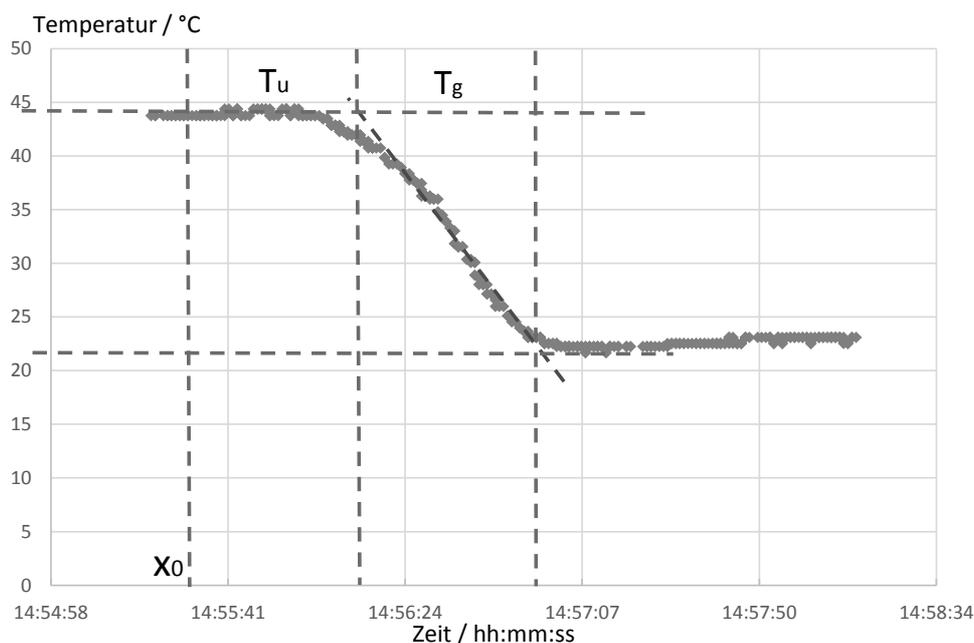


Abbildung 6.7.: Sprungantwort der Rücklaufemperatur

$x_0$  ist der Zeitpunkt des Sprungs der Stellgröße. Daraus ergeben sich folgende Parameter:

$$K_s = 0,499$$

$$T_u = 42s$$

$$T_g = 38s$$

Aus diesen Werten können die Parameter des PID-Reglers bestimmt werden:

$$K_p = 1,088$$

$$T_n = T_g = 38s$$

$$T_v = 0,5 * T_u = 21s$$

Bild 6.8 zeigt den PID-Baustein mit den eingetragenen Werten.

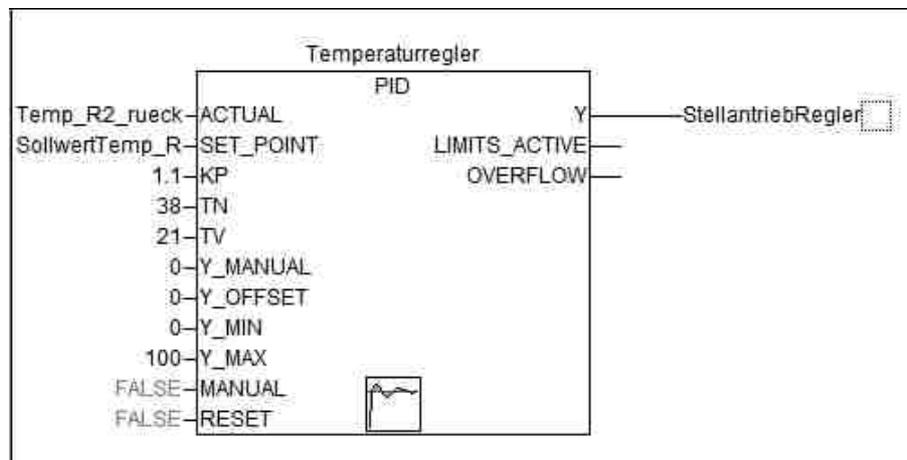


Abbildung 6.8.: PID-Baustein zur Temperaturregelung

Abgesehen von den Parametern spielen die in Tabelle 6.2 genannten Variablen eine Rolle.

Tabelle 6.2.: Variablen des PID-Bausteins

<i>ACTUAL</i>	Istwert Regelgröße
<i>SET_POINT</i>	Sollwert Regelgröße
<i>Y</i>	Stellgröße
<i>Y_MIN</i>	Minimum Stellgröße
<i>Y_MAX</i>	Maximum Stellgröße

Die anderen Variablen sind für diese Anwendung nicht relevant.

## Regelung thermische Leistung

Für die Regelung der Leistung muss die Sprungantwort der thermischen Leistung ausgewertet werden.

## 1. Test Sprungantwort

Es wird ein Sprung von 30 % auf 100 % auf die Leistung der Pumpe gegeben. Bild 6.9 stellt die Antwort der thermischen Leistung dar.

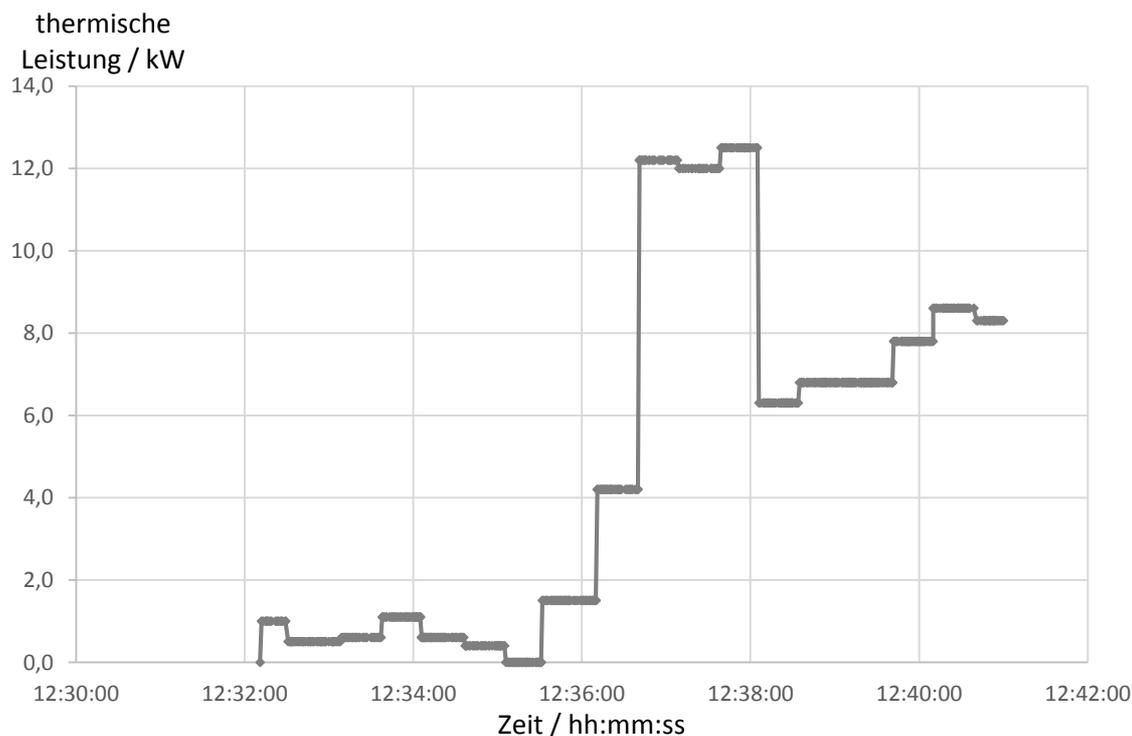


Abbildung 6.9.: Sprungantwort der thermischen Leistung

## Ergebnis

Es liegen nur alle 30 s Leistungswerte vor. Es fällt auf, dass dies die Regelungsaufgabe deutlich erschwert. Deswegen soll herausgefunden werden, warum der Abstand zwischen den Messungen so groß ist.

## Schlussfolgerungen

Verschiedene Möglichkeiten bestehen, die den Abstand zwischen den Messungen erklären könnten. Einerseits sollte die Abtastrate des WMZ überprüft werden. Außerdem

kann das Problem bei dem Programm zur Wandlung von M-Bus auf Modbus liegen bzw. an der Anzahl der WMZ, die an das Programm angeschlossen sind. Dieses Programm wird in Kapitel 6.3 näher beschrieben, es ist jedoch notwendig in diesem Kapitel schon kurz darauf einzugehen.

## Überprüfung der Schlussfolgerungen

Die Zykluszeit des CoDeSys Programms liegt bereits bei 5 ms, deswegen ist an dieser Stelle eine Verkürzung der Zeit nicht möglich. Das Löschen von überflüssigem Code für die Visualisierung bewirkt keine Verbesserung. Das Problem liegt also nicht bei der Programmierung der Wandlung. Wenn nur ein WMZ angeschlossen wird, ändert sich ebenfalls nichts an der Zeit.

Dem Datenblatt des WMZ kann entnommen werden, dass die Temperaturmessung des WMZ nur alle 30 s erfolgt [vgl. 12]. Da die Leistung aus Volumenstrom und Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf berechnet wird, kann ein Leistungswert nur alle 30 s erfolgen. Um die Leistungsregelung zu optimieren, wird eine höhere Abtastrate für die Temperaturmessung benötigt.

## Maßnahmen

Eine Temperaturmessungen mit den PT1000 Sensoren würden dieses Kriterium erfüllen. Allerdings ist an der Rückkühlung kein Sensor zur Messung der Vorlauftemperatur verbaut. Die Temperatur TE2 im Vorlauf des Erzeugers könnte genutzt werden. Dafür müssen die Temperaturen TRW1 und TE2 verglichen werden. Wenn die Temperaturen zeitlich um weniger als 30 s versetzt sind, dann könnte eine Leistungsberechnung mittels TE2 und TR1 erfolgen. Es zeigt sich jedoch, dass die Werte um mehr als 60 s versetzt sind und TE2 für eine Leistungsregelung unbrauchbar ist.

Könnte der Temperatursensor des WMZ direkt an die SPS angeschlossen werden, dann ließe sich das Problem umgehen. Das Gehäuse des WMZ lässt sich nicht ohne Weiteres öffnen, allerdings kann der Temperatursensor aus seiner Hülse im Rohr geschraubt werden und durch einen PT1000 ersetzt werden. Eine Schaltung des WÜST-Moduls kann zum Anschluss an die SPS genutzt werden. Der Temperatursensor des WMZ kann dann als zusätzlicher Außentemperaturfühler benutzt werden. Die Wärmeleistung wird aus der Formel 2.6 mit dem gemessenen Volumenstrom und der Temperatur berechnet. Die Visualisierung wird an die neuen Temperatursensoren angepasst.

## 2. Test Sprungantwort

Es wird erneut ein Sprung auf die Pumpe gegeben. Es wird ein kleinerer Sprung von 30 % auf 70 % gewählt. Anderenfalls ist die Wärmeabnahme an der Rückkühlung so groß, dass die P4H-Anlage die Vorlauftemperatur nicht aufrecht erhalten kann und die thermische Leistung dadurch nach dem Sprung sinkt.

## Ergebnis

Bild 6.10 zeigt die Sprungantwort der thermischen Leistung.

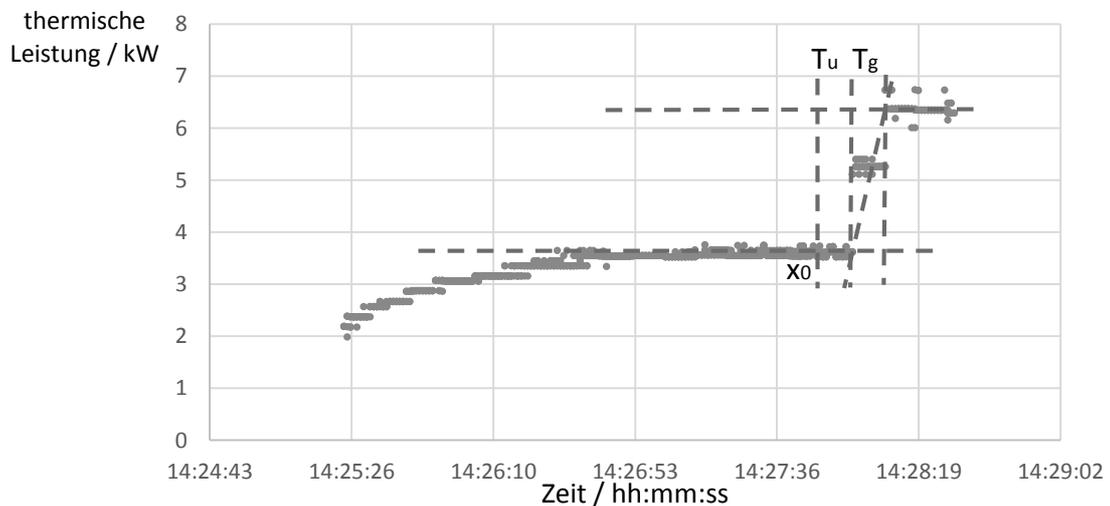


Abbildung 6.10.: Sprungantwort der thermischen Leistung mit neuem Temperatursensor

Aus dem Kurvenverlauf lassen sich die Koeffizienten bestimmen. Allerdings kann die Tangente nicht ganz genau angelegt werden. Eine Optimierung der Parameter kann im Anschluss noch erfolgen, falls dies nötig erscheint.

$x_0$  ist der Zeitpunkt des Sprungs der Stellgröße. Daraus ergeben sich folgende Parameter:

$$K_s = 1,082$$

$$T_u = 9s$$

$$T_g = 9s$$

Aus diesen Werten können die Parameter des PID-Reglers bestimmt werden:

$$K_p = 0,56$$

$$T_n = T_g = 9s$$

$$T_v = 0,5 * T_u = 4,5s$$

In Bild 6.11 ist der PID-Baustein für die Leistungsregelung abgebildet.

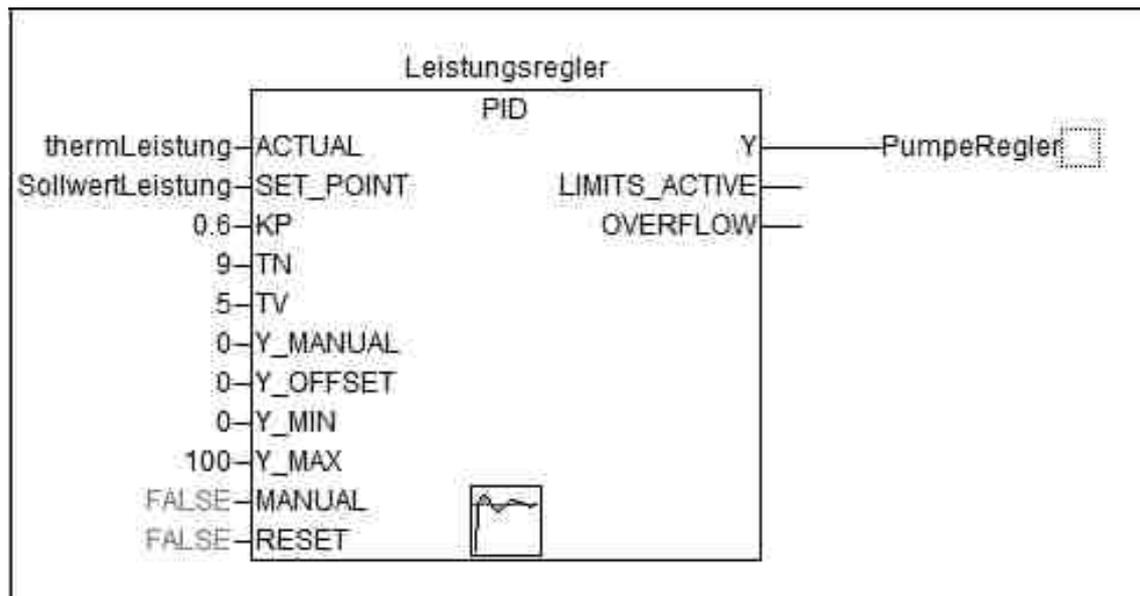


Abbildung 6.11.: PID-Baustein zur Leistungsregelung

Der Wert für  $T_v$  wurde auf 5 s aufgerundet.

## Wahl der Regelart

Damit zwischen einer manuellen und automatischen Regelung der Leistung und der Temperatur gewählt werden kann, wurde das Programm der Rückkühlung ergänzt. In der Visualisierung kann über die Eingabe von 0 oder 1 die manuelle Eingabe aus oder ein geschaltet werden. Ist die Eingabe ausgeschaltet, dann können Sollwerte für Temperatur und Leistung eingegeben werden und die Regler übernehmen die Einstellung der Pumpe und des Stellantriebs. Ist die manuelle Eingabe eingeschaltet, dann können die Werte für die Pumpe und den Stellantrieb direkt eingegeben werden.

### 6.3. Erzeuger

Die folgenden Aufgaben des Erzeugers wurden bereits genannt:

- Erfassung von Temperaturen, Drücken und der Stellung des Stellantriebs
- Auslesen der WMZ
- Übergabe der WMZ-Daten am Heizlüfter an die SPS der Rückkühlung
- Übertragung der Daten zwischen den SPS mittels Modbus Protokoll
- Kommunikation mit den P4H-Anlagen
- Visualisierung aller Daten des Versuchsstandes

Die Druck- und Temperaturerfassung wurde bereits beschrieben, ebenso wie die Ansteuerung des Stellantriebs. Damit sind alle Komponenten, die direkt an die Klemmen der SPS angeschlossen sind, erfasst.

### Wärmemengenzähler

Die Wärmemengenzähler werden über die Serielle Schnittstelle des Controllers ausgelesen. Das Programm zum Auslesen der Verbrauchszähler wird modifiziert. Das Programm besteht aus verschiedenen Teilen. Die Visualisierung des ursprünglichen Programms wurde entfernt und die Werte in die eigene Visualisierung eingebettet. Ein Hauptprogramm ruft die Programme GetHeatValues und M-BusMaster auf. Es sind zusätzlich Programme enthalten, um Werte für Wasser- und Stromzähler zu lesen. Diese wurden entfernt, da sie nicht benötigt werden. Das Programm M-BusMaster auf Bild 6.12 enthält einen Funktionsblock, der zur Kommunikation mit der seriellen Schnittstelle dient. [Vgl. 27]

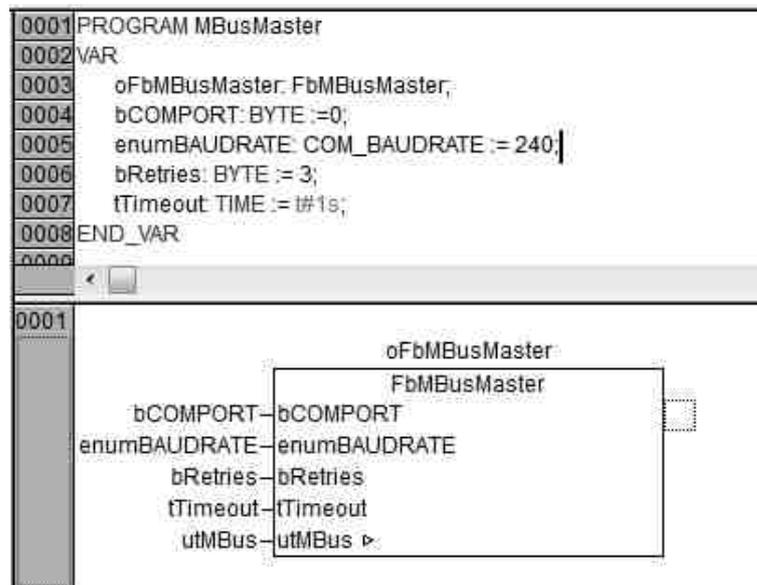


Abbildung 6.12.: Auszug aus der Programmierung für die Kommunikation mit der seriellen Schnittstelle

Die Parameter Baudrate, Anzahl der Telegrammwiederholungen und Time-out-Zeit werden an dem Baustein vorgegeben. In der ursprünglichen Version ist der Comport mit 2 belegt, für das Auslesen der internen Schnittstelle am Controller muss dort allerdings eine 0 eingefügt werden.

In einer Globalen Variablenliste in Bild 6.13 wird die maximale Anzahl der WMZ festgelegt und das Modbus Array definiert.

```

0001 VAR_GLOBAL
0002   aValuesHeatModbus AT%MW0 :ARRAY[1..bMaxNumberOfMeterHeat] OF typModbusValuesHeat;
0003
0004
0005   utMbus: typMbus;
0006   bHandshake: BYTE := 1; (*Handshake signal*)
0007   bNumberOfActiveMeterPrograms: BYTE; (*Number of called meter programs*)
0008 END_VAR
0009
0010 VAR_GLOBAL CONSTANT
0011   (*The minimum number of meters must be "1".*)
0012   bMaxNumberOfMeterHeat: BYTE := 3; (*Number of heat meters to read out*)
0013
0014 END_VAR

```

Abbildung 6.13.: Globale Variablenliste für das Auslesen der WMZ [Vgl. 27]

Programm GetHeatValues liest die Werte der WMZ aus. Die Werte werden in Mod-

bus Arrays gespeichert und in eine Visualisierung übertragen. Für das Auslesen der WMZ müssen diese adressiert werden. Dies erfolgt über die Seriennummer der WMZ. Die Adressen können in einer Tabelle der Visualisierung eingetragen werden und werden dann in dem dazugehörigen Array gespeichert. Da der Visualisierungsteil aus der Programmierung entfernt wurde, muss die Adresszuweisung anders erfolgen. Bild 6.14 zeigt den Teil, der dem ursprünglichen Code hinzugefügt wurde.

```

0162 IF i=1 THEN
0163 atypValuesHeat[i].dwAddress:=16#15262166;           (*Adresse WMZ 1*)
0164 END_IF;
0165
0166 IF i=2 THEN
0167 atypValuesHeat[i].dwAddress:=16#15262160;           (*Adresse WMZ 2*)
0168 END_IF;
0169
0170 IF i=3 THEN
0171 atypValuesHeat[i].dwAddress:=16#15262161;           (*Adresse WMZ 3*)
0172 END_IF;

```

Abbildung 6.14.: Auszug aus der Programmierung für das Auslesen der WMZ

Die Adressierung wird ohne Umweg über die Visualisierung in ein Array geschrieben und muss hexadezimal erfolgen, weswegen vor der Seriennummer ein 16# steht.

## SPS als Master

Um die SPS als Master zu benutzen wird der Modbus-Master von CoDeSys genutzt. Dort können Slaves eingefügt werden, denen die IP-Adresse der SPS bzw. der P4H-Anlagen zugeordnet wird. Den Slaves müssen lediglich Variablen untergeordnet und diese definiert werden. Danach kann CoDeSys den Code für die Kommunikation erstellen. Es können generische Variablen oder sogenannte PFC-Variablen definiert werden. PFC-Variablen sind Variablen, die zur Kommunikation zwischen Controllern von WAGO benutzt werden können. Zur Kommunikation mit anderen Geräten werden generischen Variablen verwendet. [vgl. 29]

Tabelle 6.3 zeigt eine Übersicht über die Eigenschaften, die den Variablen zugewiesen werden können und die Art der Zuweisung.

Tabelle 6.3.: Art der Eigenschaften Zuweisung [Vgl. 22]

	PFC-Variablen	generische Variablen
Name	manuell	manuell
Datentyp	manuell	manuell
Art des Zugriffs	manuell	manuell
Adresse	automatisch	manuell

Wurden PFC-Variablen definiert, dann kann die automatisch erzeugte Adresse kopiert und in der Variablenliste des Slaves eingefügt werden. Dort kann mit der Variable wie mit einer lokalen Variable programmiert werden.

Die Daten der thermischen Leistung des Heizlüfters werden an die SPS der Rückkühlung weitergegeben. Außerdem werden alle Daten der Messtechnik für die Visualisierung benötigt und werden über PFC-Variablen von der Rückkühlung und der WÜST auf die Erzeuger SPS übertragen.

## Kommunikation mit P4H-Anlagen

Die Kommunikation mit den P4H-Anlagen funktioniert über generische Variablen. Diesen werden die Function Codes und die Adressen manuell zugeordnet. Die Daten der P4H-Anlage sind vom Datentyp Word und werden über die Holding Registers abgefragt. Bild 6.15 zeigt den Code der das Lebensbit erzeugt. Es wird ein Timer genutzt mit dessen Hilfe die Variable *m* ihren Wert alle 10 s zwischen 1 und 0 wechselt.

```

0036 (*Erzeugung Lebensbit zur P4H*)
0037
0038 timer(IN := Var1, PT:=T#10s);
0039 Var2:=timer.Q;
0040
0041 IF Var2=TRUE THEN
0042 IF m=1 THEN
0043 m:=0;
0044 ELSIF m=0 THEN
0045 m:=1;
0046 END_IF
0047 Var1:=FALSE;
0048 END_IF;
0049
0050 IF Var1=FALSE AND timer.ET=T#0s THEN
0051 Var1:=TRUE;
0052 END_IF;
0053 (*#####*)

```

Abbildung 6.15.: Code zur Erzeugung des Lebensbits

Die Variable wird an die P4H-Anlage als Antwort auf das gelesene Lebensbit übertragen. Über die Visualisierung kann die Freigabe für den Externen Betrieb auf 1 gesetzt werden. Danach können in der Visualisierung Sollwerte für die Leistung und die Vorlauf-temperatur gesetzt werden.

Da die Verbindung zu der zweiten Anlage herstellerseitig noch nicht möglich ist, kann das Konzept für die gemeinsame Steuerung der P4H-Anlagen noch nicht praktisch umgesetzt werden. Der in Bild 6.16 dargestellte Code steht deswegen in einem gesonderten Projekt und muss später in dem Erzeuger Projekt ergänzt werden.

```

0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003 LeistungEingabe: REAL; (*Leistung die vom user eingegeben wird*)
0004 MaxLeistung: REAL; (*maximale Leistung die an die P4H1 weitergegeben wird*)
0005 e: REAL; (*Hilfsvariable zu Differenzbildung*)
0006 MaxLeistung2: REAL; (*maximale Leistung die an die P4H2 weitergegeben wird*)
0007 END_VAR
0008
0009
0001 e:=LeistungEingabe-90;
0002
0003 IF LeistungEingabe<=90 THEN
0004 MaxLeistung:=LeistungEingabe;
0005 MaxLeistung2:=0;
0006 ELSIF LeistungEingabe > 90 AND e<12 THEN
0007 MaxLeistung2:=12;
0008 MaxLeistung:=90-(12-e);
0009 ELSIF LeistungEingabe >90 AND e>12 THEN
0010 MaxLeistung:=90;
0011 MaxLeistung2:=LeistungEingabe-90;
0012 END_IF;

```

Abbildung 6.16.: Code zur Leistungssteuerung beim Betrieb von 2 P4H-Modulen

# 7. Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Um die Konzepte und deren Umsetzung überprüfen zu können, müssen diese anhand der fünf Betriebsfälle validiert und bewertet werden.

- Fall 1a: Elektrische Last
- Fall 1b: Elektrische Last mit Vorlauftemperaturprofil
- Fall 2a: Thermische Last
- Fall 2b: Thermische Last mit Rücklauftemperaturprofil
- Fall 3: Testbetrieb Wärmeübergabestation

Außerdem wird eine Überprüfung der gemessenen Temperaturen und Drücke vorgenommen. Die benutzten Abkürzungen für Temperaturen und Drücke beziehen sich auf die Nummerierung in Bild 6.1.

## 7.1. Temperaturen

Um die Temperaturen zu überprüfen soll die Genauigkeit der Schaltungen zur Temperaturmessung bestimmt werden. Außerdem wird die Temperaturmessung TR1 mit der Messung TRW2 des WMZ verglichen. Die Schaltungen werden geprüft indem an zwei PT1000 der Widerstand mit einem Multimeter und vergleichsweise mit der Schaltung gemessen wird. Tabelle 7.1 zeigt die Ergebnisse. Die Ergebnisse sind unter der Annahme entstanden, dass das Multimeter richtig misst.

Tabelle 7.1.: Vergleichsmessung PT1000

$R$ IC-Schaltung / $\Omega$	$R$ Multimeter / $\Omega$	$\Delta T$ / $^{\circ}\text{C}$	rel. Fehler der Temperatur / %
1095	1076	4,89	25,09
1097	1079	4,64	22,87

Daraus ergeben sich Temperaturunterschiede der Messung von über 4 °C und eine relative Abweichung von über 20 %. Die Schaltungen müssten für eine genaue Temperaturmessung kalibriert werden und Werte bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen werden. Nach dem Abklemmen des PT1000 funktioniert allerdings eine Schaltung der Rückkühlung nicht mehr. Zur ausführlichen Fehlersuche fehlt im Rahmen der Bachelorarbeit die Zeit. Da außerdem die Befürchtung besteht, dass danach weitere Schaltungen defekt sein könnten, wird keine Kalibrierung durchgeführt.

Im Vergleich mit der Temperaturmessung des WMZ treten Regelabweichungen von 2 bis 3 °C auf. Es zeigt sich außerdem, dass die Temperaturmessung des WMZ träger ist. Das liegt vor allem daran, dass nur alle 30 s ein Wert gelesen und weitergegeben wird und die reale Reaktionszeit der Sensoren nicht feststellbar ist.

## 7.2. Drücke

Um die Drücke anzupassen, wird der Druck der Wassersäule berechnet, der durch den Höhenunterschied der eingebauten Drucksensoren entsteht. Der oberste Drucksensor wird dafür als Nullpunkt definiert und je nach vertikaler Entfernung der anderen Sensoren wird von deren Werten der hydrostatische Druck subtrahiert. Der hydrostatische Druck berechnet sich nach Formel 2.5. Der Luftdruck an der Flüssigkeitsoberfläche ist in diesem Fall nicht relevant, da nur der Druckunterschied zwischen den Sensoren berechnet werden soll. Tabelle 7.2 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 7.2.: Hydrostatische Drücke

	vertikaler Abstand / cm	hydrostatischer Druck / bar
PR1 und PE1	0	0
PE2	4	0,004
PW1, PW2 und PR1	40	0,04

Zusätzlich wird der Druckverlust am Heizlüfter und die Druckdifferenz an der Pumpe der Rückkühlung bestimmt. Der Druck PR1 wird mit dem Druck PE2 verglichen. Daraus kann die Druckdifferenz an der Pumpe bestimmt werden und diese auf die Pumpleistung bezogen werden. Dazu wird die Pumpleistung in Schritten von 30 % auf 100 % erhöht. Unterhalb von 30 % sind die durch die Pumpe verursachten Volumenströme so gering, dass keine aussagekräftige Messung gemacht werden kann. Die in Bild 7.1 dargestellte Druckdifferenz liefert einen polynomischen Verlauf 2ten-Grades.

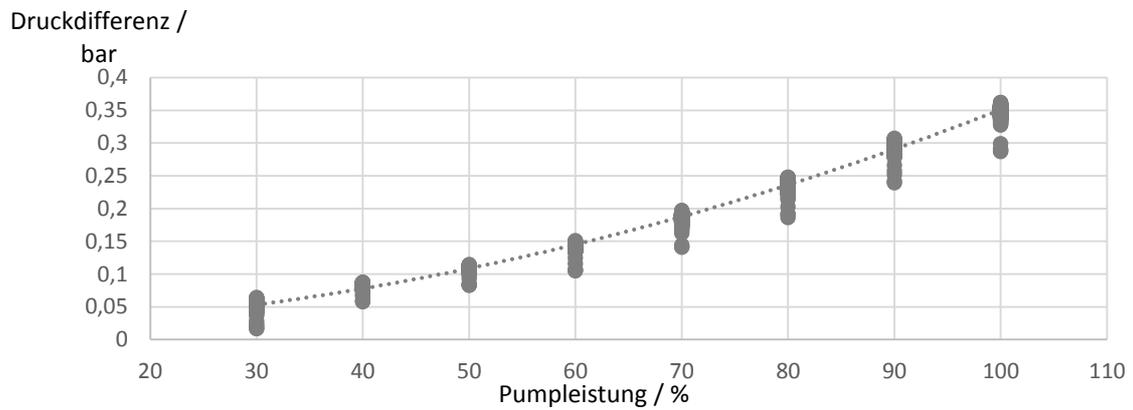


Abbildung 7.1.: Druckdifferenz an der Pumpe bezogen auf die Leistung der Pumpe

Um die Druckdifferenz am Heizlüfter zu bestimmen, werden Druck PR1 und PR2 gemessen. Die Leistung des Heizlüfter steht währenddessen auf 0 %. Bild 7.2 zeigt den Verlauf der Druckdifferenz im Abhängigkeit zu der Pumpleistung.

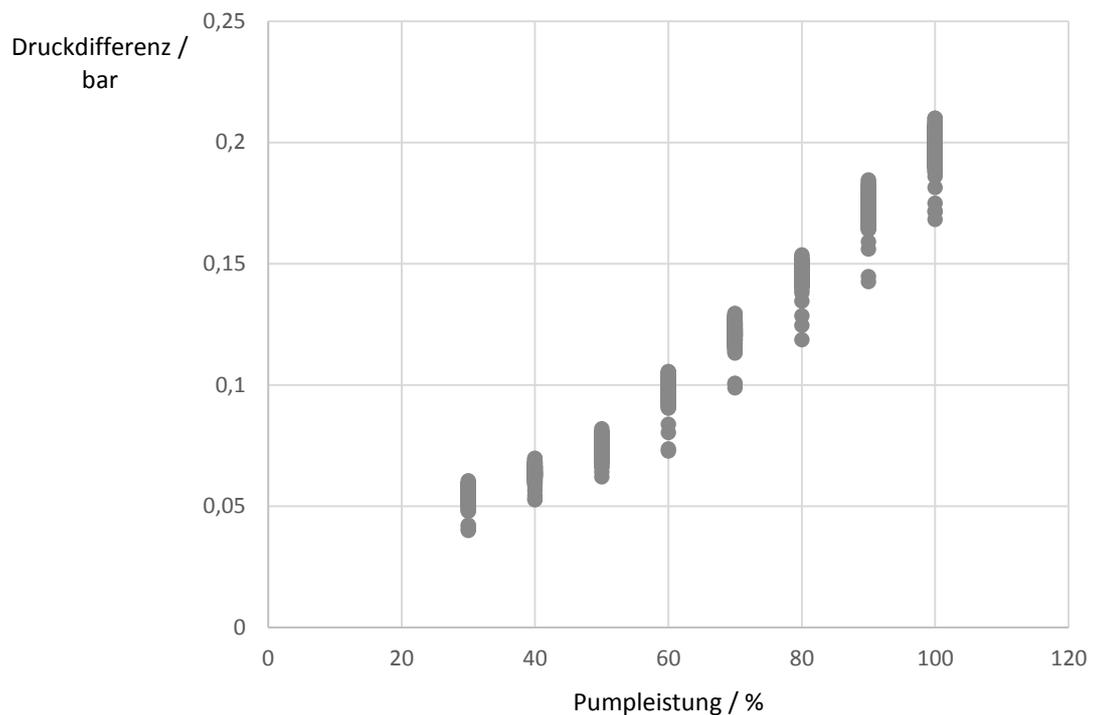


Abbildung 7.2.: Druckmessung vor und nach dem Heizlüfter

Dabei ergibt sich ein maximaler Druckabfall durch den Heizlüfter von etwa 0,18 bar bei einer Pumpleistung von 100 % und ein minimaler Abfall von 0,06 bar bei einer Leistung von 30 %.

### 7.3. Elektrische Last

Um die Elektrische Last vorzugeben wird die Regelung der P4H-Anlagen genutzt. Wird das Lebensbit an die Anlage übergeben und eine Freigabe zum Externen Betrieb erteilt, dann können Werte gelesen werden und Sollwerte für die maximale Leistung und die Vorlauftemperatur werden übernommen.

Für das Abfahren eines Lastprofils muss der Wert für *LeistungsbegrenzungVL Soll+Hysterese* stark erhöht werden. Zur Zeit ist ein Auslesen der tatsächlichen Leistung über das Register 22 jedoch nicht möglich. Bis zum Abschluss der Bachelorarbeit konnte das Problem mit dem Hersteller nicht gelöst werden. Es ist ohne diesen Wert nicht möglich zu überprüfen, ob eine stabile elektrische Last mit der aktuellen Regelung des Herstellers machbar ist.

Da die Software der zweiten P4H-Anlage ebenfalls noch bearbeitet werden muss, ist der Betrieb und die Regelung dieser Anlage über Modbus bisher nicht freigeschaltet. Deswegen konnte nur eine Anlage betrieben und getestet werden. Das Konzept zur gemeinsamen Leistungsregelung der zwei Anlagen kann in CoDeSys simuliert werden. Tabelle 7.3 stellt die Ergebnisse dar.

Tabelle 7.3.: Ergebnisse der simulierten Leistungsregelung

	Sollwert Leistung / kW	Leistung P4H1 / kW	Leistung P4H2 / kW
1. Einstellung	5	5	0
2. Einstellung	9	9	0
3. Einstellung	10	8,8	1,2
4. Einstellung	12	9	3
5. Einstellung	5	5	0

Das Konzept konnte validiert werden und die Aufteilung der Leistung funktioniert in den drei beschriebenen Fällen.

## 7.4. Elektrische Last mit vorgegebenem Vorlaufemperaturprofil

### Vorlauftemperaturregelung

Wird die Vorlauftemperatur mit der P4H-Anlage geregelt, dann schwankt diese stark um den Sollwert. Bild 7.3 zeigt den Verlauf der Vorlauftemperatur.

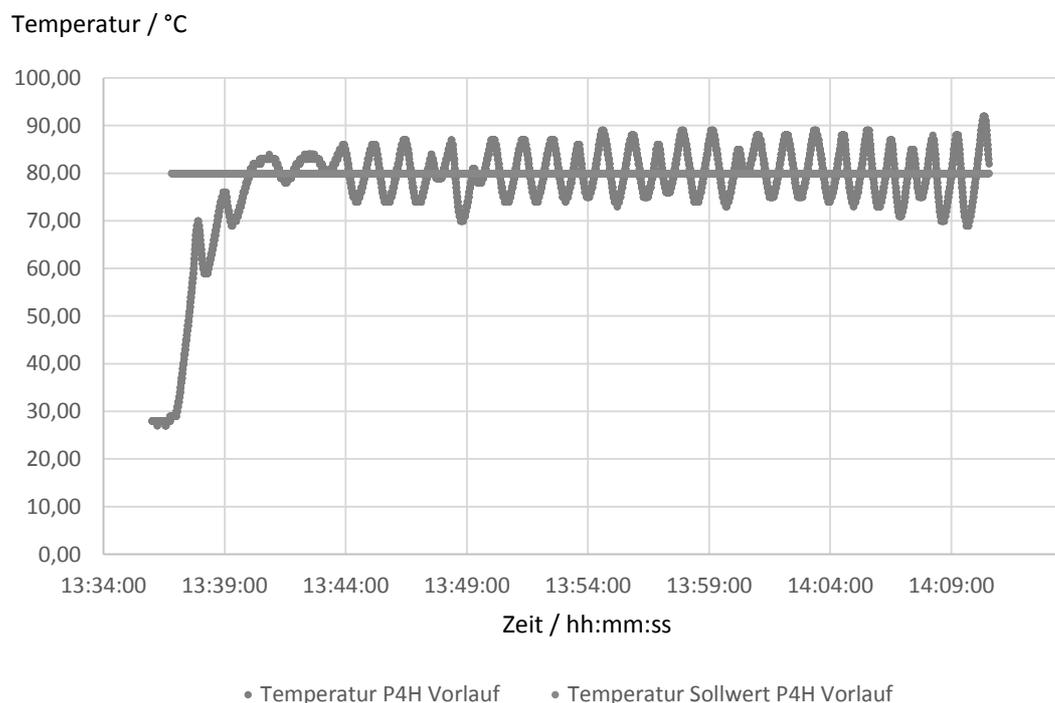


Abbildung 7.3.: Temperaturschwankungen der Vorlauftemperatur

Bei einem Sollwert von 80 °C schwankt die Temperatur zwischen 70 und 90 °C. Eine Vorlaufbeimischung ist dementsprechend notwendig. Eine Beimischung des Rücklaufs in den Vorlauf ist auf Grund eines falsch eingebauten Ventils noch nicht möglich. Bild 7.4 zeigt einen Ausschnitt der Verrohrung. Das Ventil besitzt zwei Eingänge und einen Ausgang, was an dieser Stelle nur eine Vorlaufbeimischung in den Rücklauf ermöglichen würde. Zur Vorlauftemperaturstabilisierung ist der Austausch dieses Ventils erforderlich.

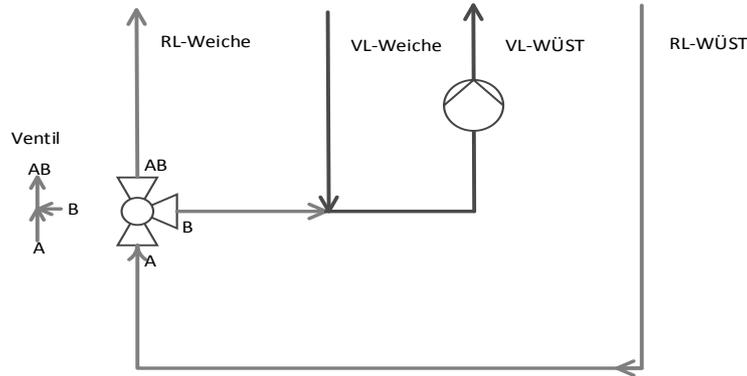


Abbildung 7.4.: Skizze des falsch verbauten Ventils

## Schwankungen der elektrischen Leistung

Wenn von der Rückkühlung viel Wärme abgenommen wird, dann beginnt die Leistungsanzeige in der Webvisualisierung stark zu schwanken. Bei einer Solltemperatur von 80 °C können dann Temperaturen von bis zu 100 °C im Vorlauf der P4H-Anlagen erreicht werden. Um dem Problem auf den Grund gehen zu können, werden auch hier die Leistungsdaten der P4H-Anlage benötigt. Da diese nicht vorhanden sind, wird die thermische Leistung und der Volumenstrom am Erzeuger aufgezeichnet. Bild 7.5 und 7.6 stellen den Verlauf dar.

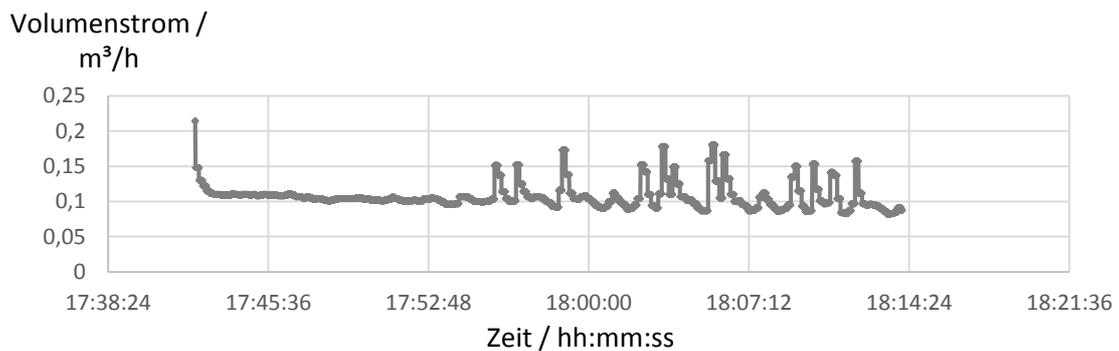


Abbildung 7.5.: Volumenstrom an der P4H1-Anlage

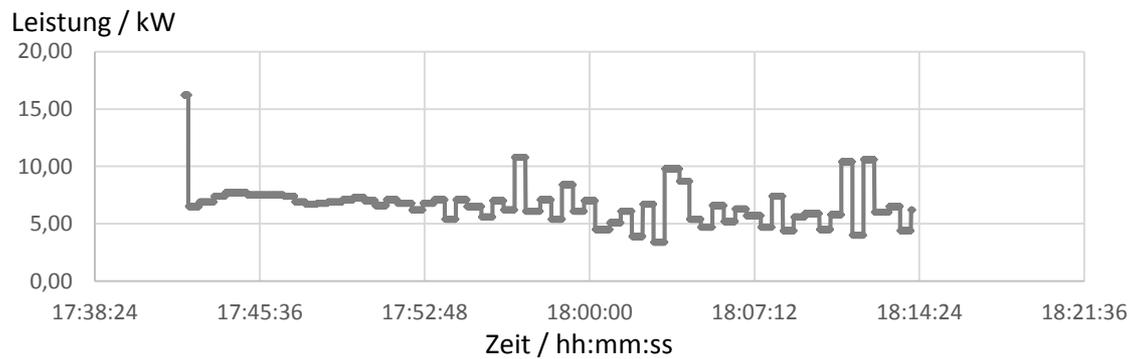


Abbildung 7.6.: Thermische Leistung an der P4H1-Anlage

Die thermische Leistung weist deutliche Schwankungen auf, was daran liegt, dass auch der Volumenstrom zu schwanken beginnt. Um dem Problem auf den Grund zu gehen, sollten Messungen durchgeführt werden, bei denen die aktuelle Leistung bei hohen Temperaturen und einer großen Wärmeabnahme von der Rückkühlung aufgezeichnet wird.

## 7.5. Thermische Last

Die Regelung der thermischen Leistung wird getestet. Bild 7.7 zeigt einen Ausschnitt daraus.

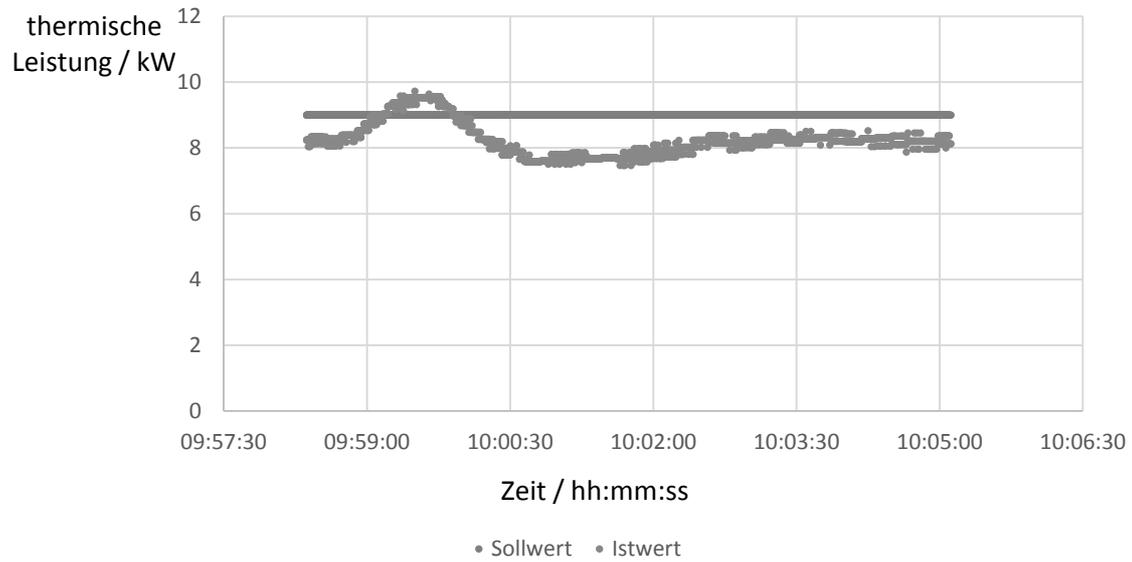
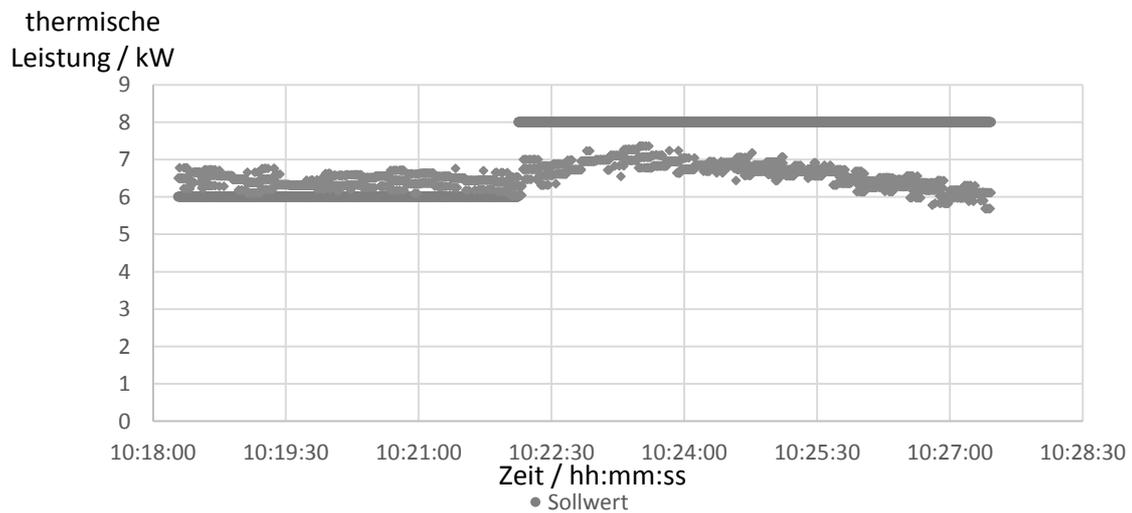


Abbildung 7.7.: Regelung der thermische Leistung

Die Regelung funktioniert bereits gut, jedoch liegt der Wert noch unterhalb des Sollwertes. Deswegen wird  $K_p$  angepasst und auf 0,8 erhöht. Bild 7.8 zeigt das Ergebnis.

Abbildung 7.8.: Thermische Leistung bei angepasstem  $K_p$

Die Istwerte liegen nun näher an den Sollwerten. Allerdings treten Schwankungen der Leistung auf. Trotz Erhöhung des Sollwertes sinkt die Leistung in Bild 7.8 ab. Wie bereits in Bild 7.3 gezeigt wurde, schwankt die Vorlauftemperatur. Die Rücklauftemperatur dagegen bleibt recht konstant. Die Temperaturdifferenz, von der die thermische Leistung abgesehen vom Volumenstrom abhängt, sinkt dementsprechend. In Bild 7.9 ist die Abhängigkeit der Schwankungen von der Vorlauftemperatur zu sehen. Daraus lässt sich die in Bild 7.10 dargestellte Abhängigkeit der thermischen Leistung von der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf herleiten.

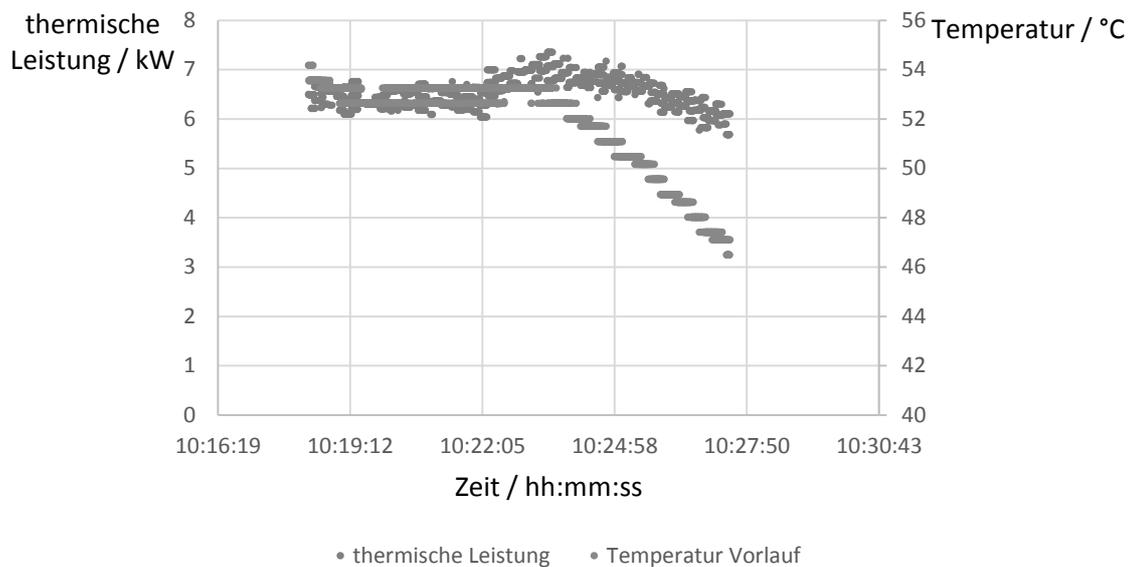


Abbildung 7.9.: Schwankungen der thermischen Leistung abhängig von der Vorlauftemperatur

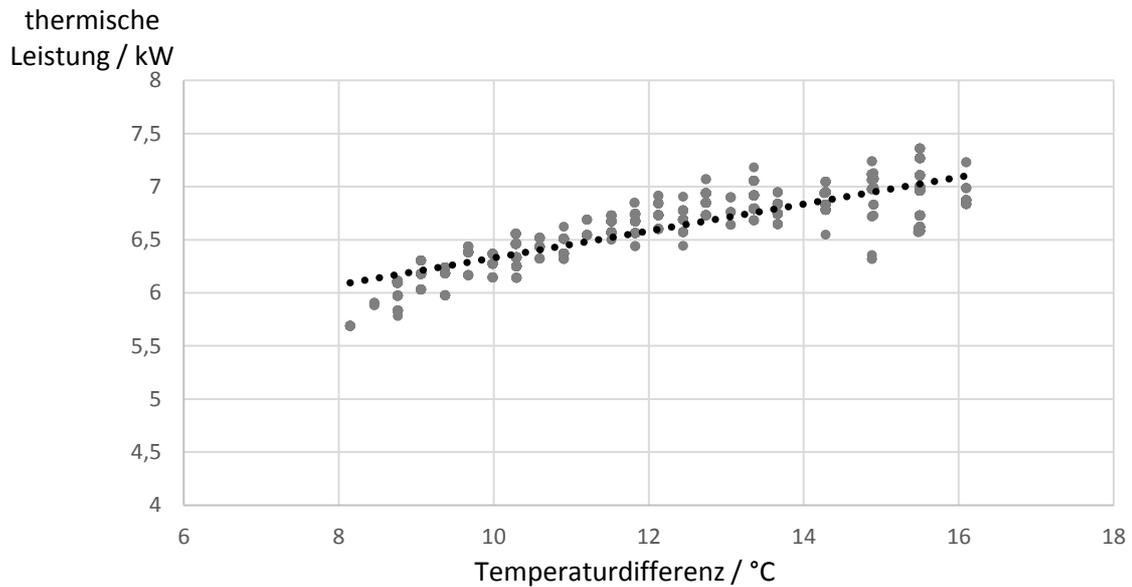


Abbildung 7.10.: Abhängigkeit der thermischen Leistung von der Temperaturdifferenz

Es lässt sich der folgende Schluss ziehen. Der Leistungsregler funktioniert bei konstanten Vorlauftemperaturen wie gewünscht. Allerdings wird er durch sich verändernde Vorlauftemperaturen stark beeinflusst. In Bild 7.3 wurde die schwankende Vorlauftemperatur dargestellt. Es sollte erst eine Stabilisierung dieser erfolgen, danach können die Parameter des Reglers noch feiner angepasst werden.

## 7.6. Thermische Last mit vorgegebenem Rücklauftemperaturprofil

Die Temperaturregelung wird zuerst bei einer konstanten thermischen Last getestet, danach wird die thermische Last variiert.

### Temperaturregelung bei konstanter thermischer Leistung

Die Temperaturregelung bei konstanter Leistung ergibt die in Bild 7.11 dargestellte Kurve.

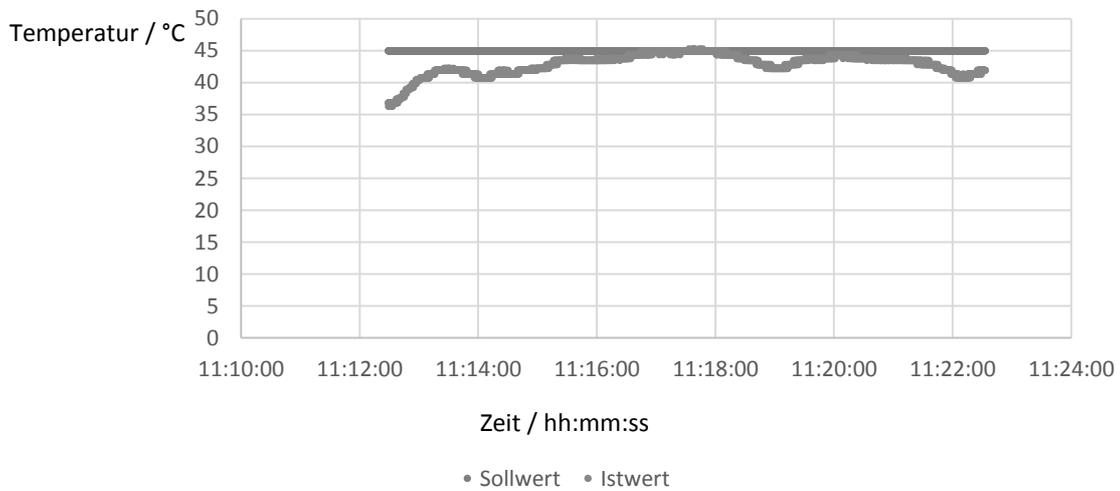


Abbildung 7.11.: Temperaturverlauf des PID-Reglers

Aus der dargestellten Kurve lässt sich erkennen, dass nur eine geringe Regelabweichung bleibt. Allerdings benötigt der Regler nach Änderung des Sollwertes recht lange, um einen neuen Wert einzustellen. Zur Verbesserung der Regelung sollen die Parameter angepasst werden. Eine zu träge Regelung deutet auf ein zu groß gewähltes  $T_n$  hin.  $T_n$  wird deshalb auf den Wert 20 s verkleinert. Die Temperaturregelung nach der Optimierung der Parameter ist in Bild 7.12 zu sehen.

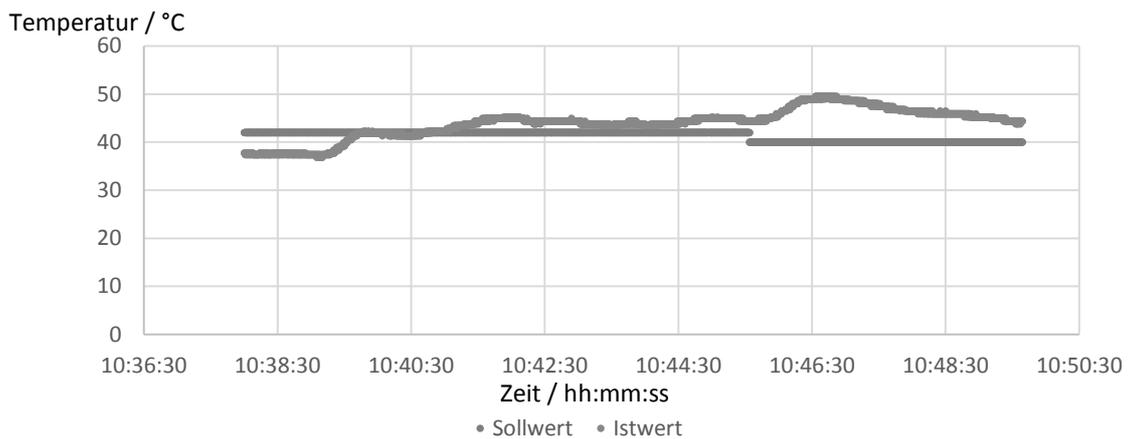


Abbildung 7.12.: Temperaturverlauf des veränderten PID-Reglers

Die Verkleinerung des Parameters  $T_n$  konnte nicht zu einer sichtbaren Verbesserung führen. Bei Veränderung des Sollwertes wird dieser erst nach mehr als 5 min erreicht. Da der Istwert den Sollwert allerdings erreicht und eine geringe Regelabweichung besteht, wird die Regelung im Rahmen der Bachelorarbeit nicht weiter verändert, da es sich um eine Feinheit in der Parametrierung handelt.

## Temperaturregelung bei variabler thermischer Leistung

Es wurden folgende Einstellungen für die Messreihe gewählt:

- el. Leistung: 9 kW
- Vorlauftemperatur: 70 °C
- Leistung Heizlüfter: 100 %

Die gemeinsame Regelung ist in Bild 7.13 und 7.14 zu sehen. Die Temperatur kann ohne Probleme auf einem Sollwert gehalten werden. Die thermische Leistung schwankt in diesem Fall jedoch stark um den Sollwert.

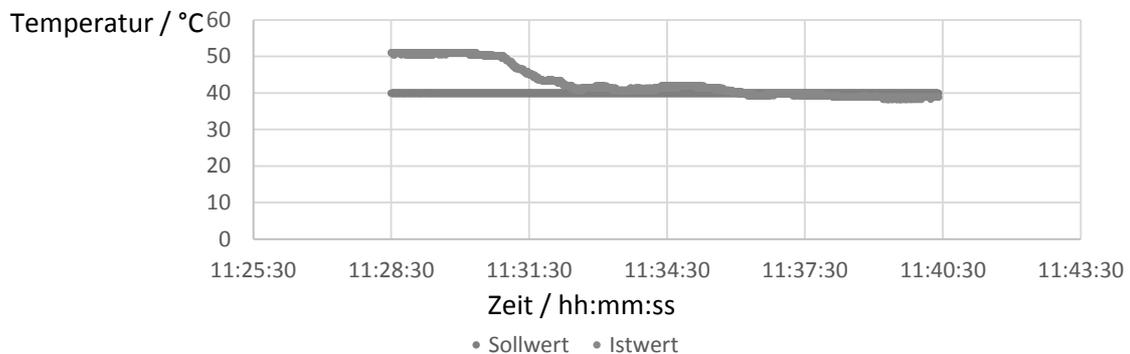


Abbildung 7.13.: Temperaturverlauf bei gemeinsamer Regelung

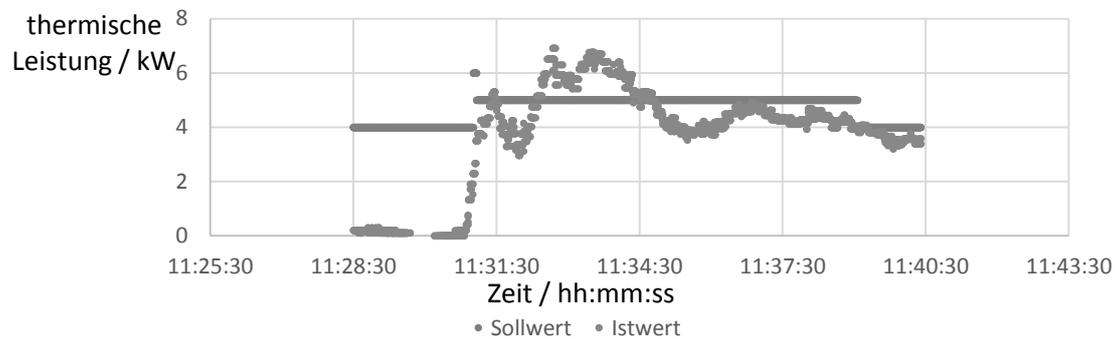


Abbildung 7.14.: Leistungsverlauf bei gemeinsamer Regelung

Bei einem erneuten Gegenüberstellen mit der Vorlauftemperatur fällt auf, dass auch diese stark schwankt. Erst nachdem die Vorlauftemperatur stabilisiert wird, kann eine gemeinsame Regelung komplett ausgewertet und optimiert werden. Die Veränderungen der Vorlauftemperatur sind jedoch vermutlich nicht nur auf Schwankungen in der Regelung zurückzuführen. Kapitel 7.7 geht darauf näher ein.

## 7.7. Testbetrieb Wärmeübergabestation

Die Regelung der thermischen Leistung in Kombination mit der Rücklauftemperaturregelung wurde oben bereits beschrieben. Bei der gleichzeitigen Regelung der Vorlauftemperatur können die oben genannten Probleme auftreten. Die Vorlauftemperatur sinkt in der in Kapitel 7.6 beschriebenen Messreihe kontinuierlich und weist gegen Ende nur noch eine Temperatur von knapp über 40 °C auf. Das lässt darauf schließen, dass die P4H-Anlage nicht in der Lage ist die benötigte thermische Leistung zu erzeugen auch wenn diese unterhalb der eingestellten Leistung an der P4H-Anlage liegt.

Allerdings ist bisher nur eine der P4H-Anlagen regelbar, weswegen derzeit noch keine Aussage über den gesamten Versuchsstand getroffen werden kann. Das weitere Vorgehen bezüglich der Problematik wird im Kapitel 9 beschrieben.

## 7.8. Fazit

Dieses Unterkapitel zeigt eine Übersicht über die Validierung und Bewertung der Ergebnisse.

## Anbindung der Messtechnik

Das Konzept zur Umsetzung der Hardware hat sich als plausibel erwiesen. Alle Sensoren konnten angeschlossen werden und werden über die SPS erfasst. Die WMZ wurden mit Hilfe des Pegelwandlers erfolgreich angeschlossen. Die SPS des Erzeugers liest die Daten der WMZ aus und gibt die benötigten Werte für die Leistungsregelung an die Rückkühlung weiter. Durch eine strukturierte Analyse konnte außerdem eine funktionierende Schaltung zur Erfassung der Temperaturen entwickelt werden.

Tabelle 7.4 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse bezogen auf die Anbindung der Messtechnik.

Tabelle 7.4.: Bewertung Anbindung der Messtechnik

Messtechnik	funktionsfähig	Probleme	Grund	Verbesserung
<b>Temperatursensoren</b>	Messung der Temperaturen	Abweichungen über 20 %	Toleranzen der Bauteile, Leitungswiderstände	Kalibrierung der Schaltung
		fehleranfällige Schaltungen	empfindliche IC's	PT1000 Klemmen von WAGO
<b>Drucksensoren</b>	Messung der Drücke	Keine		
<b>WMZ</b>	Erfassung aller Daten	Keine		

Die Temperaturmessung mittels IC-Schaltungen weist in der Praxis einige Nachteile auf. Im Kapitel 9 wird auf die Verbesserungsmöglichkeiten eingegangen.

In der Visualisierung des Erzeugers werden alle gemessenen Daten des Versuchstandes dargestellt. Bild 7.15 zeigt hierzu die Visualisierung mit den Daten.

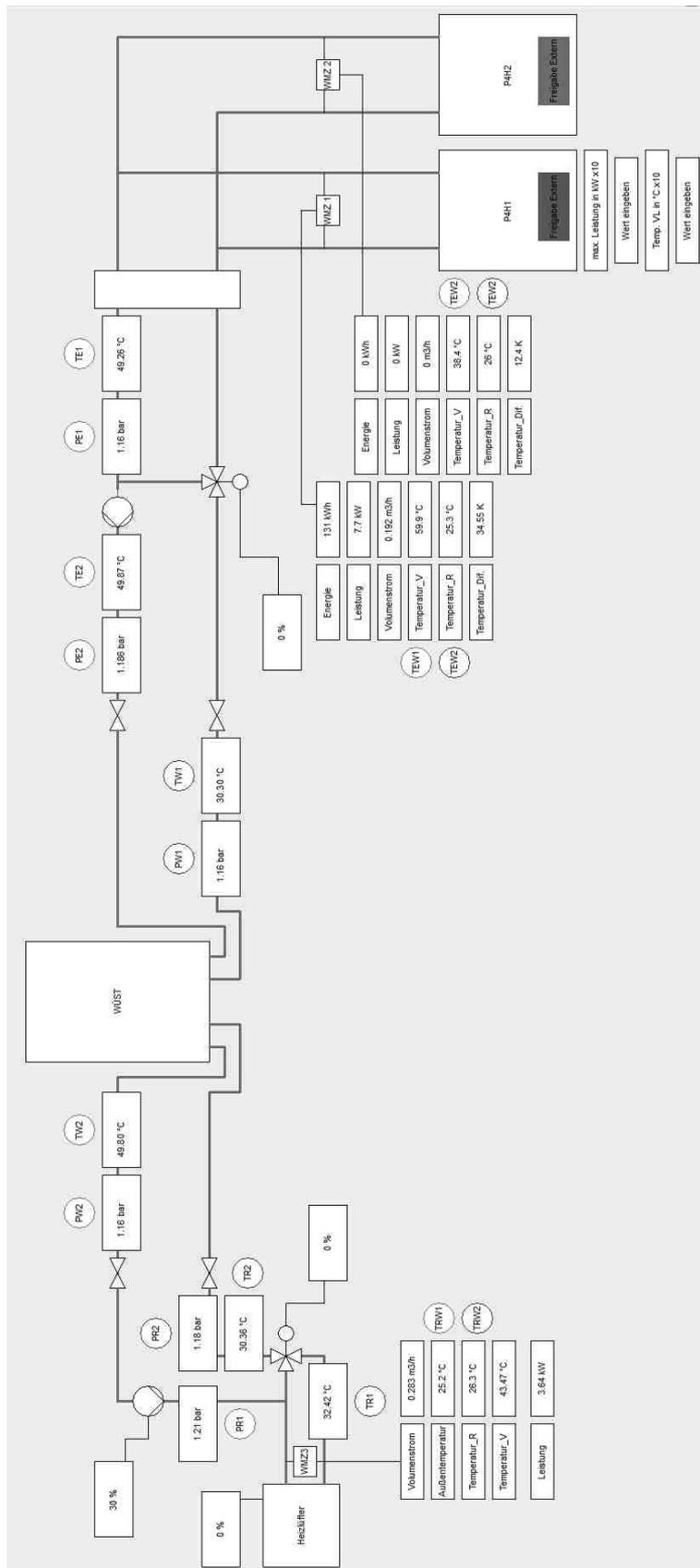


Abbildung 7.15.: Visualisierung mit allen erfassten Daten

## **Anwendungsfälle**

Die Konzepte zur Umsetzung der Steuerungs- und Regelungstechnik haben sich ebenfalls als plausibel erwiesen. Tabelle 7.5 zeigt eine Übersicht der Bewertung. Neben den Erfolgen in der Umsetzung werden Probleme, deren Ursachen und Verbesserungsvorschläge genannt, die im Rahmen der Bachelorarbeit auftraten.

Tabelle 7.5.: Bewertung der Anwendungsfälle

Anwendungsfall	funktionsfähig	Probleme	Grund	Verbesserung
<b>Elektrische Last</b>	Kommunikation mit einer P4H-Anlage	aktuelle Leistungsabfrage nicht möglich	vermutlich Fehler in der Software des Herstellers	Nachbesserung durch Hersteller
		Kommunikation mit zweiter Anlage nicht möglich	Modbus durch Hersteller nicht freigeschaltet	Nachbesserung durch Hersteller
	Einstellung einer max. el. Leistung P4H-Anlage	keine konstante Leistung / keine aktuelle Leistungsabfrage	konstante VL-temperatur hat Vorrang in der P4H-Regelung	Variable in P4H-Regelung erhöhen / s.o.
	gemeinsamer Betrieb der P4H-Anlagen (simuliert)	keine		
<b>Elektrisch Last + Vorlauf-temperatur</b>	Vorgabe der Vorlauf-temperatur	VL-temperatur schwankt stark	Regelung des P4H-Herstellers	Rücklauf-beimischung
		falsches Ventil für Rücklauf-beimischung	Fehler des Herstellers des Versuchsstandes	Nachbesserung durch Hersteller
	Einstellung einer el. Leistung mit Vorlauf-temperaturprofil	s.o.		
<b>Thermische Last</b>	Steuerung Pumpe, Heizlüfters und Stellantriebs	keine		
	Regelung der thermischen Last	keine		
<b>Thermische Last + Rücklauf-temperatur</b>	Rücklauf-temperaturregelung			
<b>Testbetrieb Wärme-übergabestation</b>	Thermische Last + Vor- und Rücklauf-temperaturregelung	Gemeinsamer Betrieb, Vorlauf-temperatur sinkt	Eine P4H-Anlage kann Wärmebedarf der Rückkühlung nicht auf Dauer decken	Test mit beiden Anlagen, ggf. Leistung des Heizlüfters reduzieren

Die Kommunikation mit einer P4H-Anlage besteht und eine Vorgabe der elektrischen Leistung ist möglich. Die Einstellung der elektrischen Leistung kann allerdings nur als Maximum vorgegeben werden, da die Regelung der Vorlauftemperatur Vorrang hat. Zur Lösung dieses Problem kann eine Variable in der P4H-Regelung erhöht werden, so dass höhere Vorlaufemperaturabweichungen möglich sind. Dadurch soll sich die Leistung stabilisieren. Zur Überprüfung dieses Konzeptes fehlt momentan lediglich der Wert der aktuellen Leistung. Ebenso wie die Kommunikation mit der zweiten P4H-Anlage bedarf dies einer Nachbesserung durch den Anlagenhersteller. Der gemeinsame Betrieb der P4H-Anlagen wurde deswegen zur Prüfung des Konzeptes simuliert und funktioniert einwandfrei. Abgesehen davon zeigen sich Schwankungen der elektrischen Leistung bei langfristiger Wärmeabnahme. Wenn die Software der P4H-Anlagen überarbeitet wurde, können diese aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Die Vorgabe der Vorlauftemperatur ist über die P4H-Anlagen möglich. Außerdem ist eine gleichzeitige Vorgabe der Last möglich, wobei die Temperatur wie bereits erwähnt Vorrang hat. Eine Vorlauftemperaturschwankung konnte aufgezeichnet werden und ein plausibles Konzept zur Stabilisierung dieser entwickelt werden. Eine Umsetzung kann erfolgen, wenn ein falsch installiertes Ventil vom Hersteller des Versuchsstandes ausgetauscht wird.

Die Steuerung des Heizlüfters, der Pumpe und des Stellantriebs zur Regelung der thermischen Last und der Rücklauftemperatur wurde erfolgreich umgesetzt. Der PID-Regler zur thermischen Leistungsregelung wurde parametrisiert und funktioniert bei konstanten Vorlauftemperaturen. Eine Abhängigkeit von der Schwankung der Vorlauftemperatur konnte festgestellt werden. Um noch bestehende Schwankungen der thermischen Leistung zu vermeiden, ist eventuell ein Justieren der Regelparameter nötig. Dafür muss jedoch erst die Stabilisierung der Vorlauftemperatur abgewartet werden.

Die Regelung der Rücklauftemperatur liefert bei konstanten thermischen Leistungen gute Ergebnisse. Bei einem gemeinsamen Betrieb kann es auf Dauer zu Problemen mit der Vorlauftemperatur und dementsprechend mit der Leistungsregelung kommen. Möglicherweise erübrigt sich das Problem durch den Anschluss der zweiten P4H-Anlage.

Im Rahmen der Validierung konnte gezeigt werden, dass die Umsetzung des Versuchsstandes mit den vorhandenen Anlagen grundsätzlich möglich und das in der Thesis entwickelte Konzept hierfür geeignet ist. Eine feinere Optimierung ist erst nach Herstelleranpassungen möglich. Es konnten allerdings Lösungen bzw. Anpassungsvorschläge entwickelt werden.

## 8. Zusammenfassung

In dieser Bachelorthesis wird ein Konzept zur Umsetzung eines Mess-, Steuerungs- und Regelungssystems für einen Teststand entwickelt. In dem Versuchsstand soll eine intelligente Wärmeübergabestation getestet werden. Im Rahmen von Forschungen zu intelligenten Wärmenetzen ist dies ein essentieller Part.

Es sollen die folgenden fünf Anwendungsfälle möglich sein, sodass abgesehen von dem Betrieb der Wärmeübergabestation, der Teststand auch als elektrische Last für das Gebäude des Energie Campus genutzt werden kann:

- Fall 1a: Elektrische Last
- Fall 1b: Elektrische Last mit Vorlauftemperaturprofil
- Fall 2a: Thermische Last
- Fall 2b: Thermische Last mit Rücklauftemperaturprofil
- Fall 3: Testbetrieb Wärmeübergabestation

Der Versuchsstand ist auf drei Module aufgeteilt. Ein Modul ist der Erzeuger, der aus elektrischer Energie Wärme erzeugt. Dafür werden Power-to-Heat Anlagen genutzt. Die anderen Module sind eine Wärmeübergabestation und eine Rückkühlung, die im Wärmenetz den Verbraucher darstellt.

In den Grundlagen dieser Arbeit wird die Messtechnik beschrieben, die notwendig ist, um alle wichtigen Größen aufnehmen zu können. Außerdem werden Grundlagen von Wärmetechnik, Speicherprogrammierbaren Steuerungen sowie der Regelungstechnik beschrieben.

Anschließend wird ein Konzept für die Hardware als auch für die Regelungs- und Steuerungstechnik entwickelt. Die Komponenten werden zur Erfassung aller Daten und zur Regelung mit Speicherprogrammierbaren Steuerungen verbunden. Danach erfolgt die Umsetzung des Regelungs- und Steuerungskonzeptes mit dem Programm CoDeSys. Die Programmierung ist auf drei Steuerungen aufgeteilt. Die SPS des Erzeugers arbeitet als Master und kommuniziert mit den Power-to-Heat Anlagen ebenso wie mit den SPS der anderen Module. Eine Visualisierung des Gesamtsystems erfolgt auf dieser Steuerung. Die Regelungen jedes Moduls sind jedoch weitestgehend unabhängig von

den anderen Modulen. Die Regelung der thermische Leistung sowie der Rücklauftemperatur erfolgt über die SPS der Rückkühlung mittels PID-Reglern. Die elektrische Leistung wird über die P4H-Anlagen eingestellt, ebenso wie die Vorlauftemperatur.

Während der Umsetzung traten Probleme mit der Anbindung der Temperatursensoren auf. Außerdem gab es Probleme mit dem Einstellen der Leistungsregelung, da nur alle 30 s Werte der thermischen Leistung durch den WMZ vorliegen. Diese konnten durch eine systematische Analyse aufgedeckt und behoben werden. Probleme auf Grund von Herstellermängeln konnten ebenfalls festgestellt werden. Die Kommunikation mit einer P4H-Anlage ist momentan nicht möglich und die Werte der aktuellen Leistung können auf der anderen P4H-Anlage nicht gelesen werden. Dazu kommt ein falsch platziertes Ventil. Diese Probleme wirken sich vor allem auf die Regelung der elektrischen Last und der Vorlauftemperatur aus und müssen durch den Hersteller behoben werden.

Zum Abschluss konnte die Eignung des Konzepts über die Validierung nachgewiesen werden. Es gibt einige Einschränkungen, jedoch ist die Inbetriebnahme des Versuchsstandes grundsätzlich möglich. Bei einer gemeinsamen Regelung der thermischen Last und der Vor- und Rücklauftemperatur treten derzeit noch Probleme auf. Um alle Anforderungen an den Versuchsstand erfüllen zu können und einen durchgehenden Betrieb zu ermöglichen, müssen jedoch erst alle Herstellermängel beseitigt werden. Nachbesserungen und Veränderungen am Versuchsstand können im Anschluss vorgenommen werden.

## 9. Ausblick

In der Thesis wurde ein Großteil des Versuchsstandes in Betrieb genommen. Für die vollständige Inbetriebnahme müssen darüber hinaus einige Punkte umgesetzt werden. Im Vordergrund steht als erstes der Austausch mit dem Hersteller des Versuchsstandes und der P4H-Anlagen. Vor allem eine Nachbesserung der P4H-Software muss zur weiteren Arbeit an dem Versuchsstand erfolgen.

Daneben muss das Ventil zur Rücklaufbeimischung ausgetauscht werden, um die Vorlauftemperatur stabilisieren zu können. Bild 9.1 zeigt eine Skizze der veränderten Verrohrung für eine Rücklaufbeimischung.

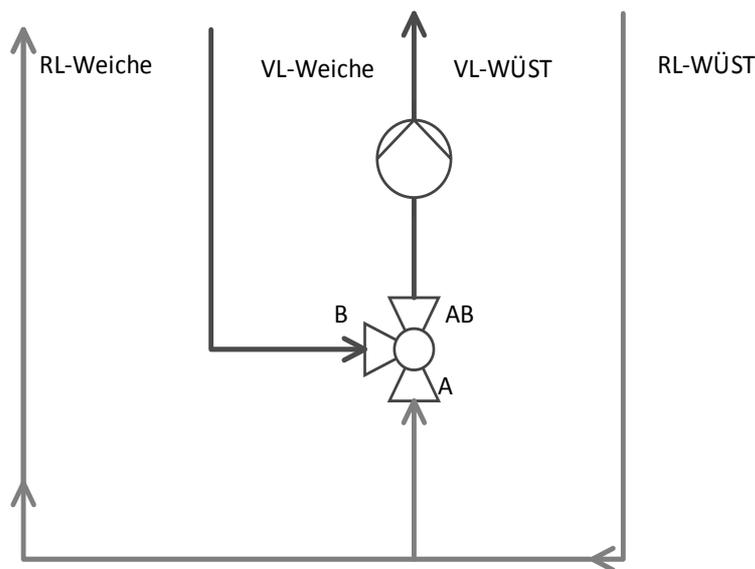


Abbildung 9.1.: Skizze für die Positionsänderung des Ventils.

Außerdem sollten Klemmen von WAGO verwendet werden, an die die PT1000 Sensoren direkt angeschlossen werden können. Eine Kalibrierung der vorhandenen Schaltungen erübrigt sich damit. Für die WÜST und den Erzeuger werden je zwei Eingänge benötigt und für die Rückkühlung vier, da dort zwei zusätzliche Temperatursensoren eingebunden wurden. Damit können die Fehleranfälligkeit und Ungenauigkeiten der Schaltung für

die Temperaturmessung behoben werden.

Wenn Nachbesserungen durch die Hersteller erfolgt sind, kann die Stabilisierung der Vorlauftemperatur über eine Rücklaufbeimischung mit einem PID-Regler umgesetzt werden. Im Anschluss kann der gesamte Versuchsstand mit allen Regelungen zum Test betrieben werden und falls nötig die Regelungsparametrierung optimiert werden. Zusätzlich sollte getestet werden, welche maximale thermische Last mit dem Heizlüfter gefahren werden kann, ohne dass die Vorlauftemperatur einbricht. Die Vorlauftemperaturen bricht ein, wenn die P4H-Anlagen nicht ausreichend Wärme nachliefern können. Die maximalen Vorlauftemperaturen an der Rückkühlung sind dabei ebenfalls von Interesse.

Um eingrenzen zu können, wann es zu Schwankungen der elektrischen Leistung kommt, sollten einige Messreihen bei hohen Leistung und Temperaturen und großer Wärmeaufnahme des Heizlüfters aufgenommen werden, sobald die Daten der Leistung gelesen werden können.

Für das Problem wäre es außerdem sinnvoll zusätzliche Temperatursensoren oben und unten in der hydraulischen Weiche zu platzieren. Mit deren Hilfe könnten die Aufwärmung der gesamten Anlage besser überwacht werden. Um außerdem eine vollständige Unabhängigkeit der einzelnen Module zu gewährleisten, sollten die Daten des WMZ an der Rückkühlung direkt an der SPS des Moduls ausgelesen werden. Dafür wird ein weiterer Pegelwandler und ein Controller mit einer seriellen Schnittstelle benötigt.

Für die Vorgabe einer elektrischen Last sollte des weiteren eine Leistungsmessung direkt am Drehstromkabel realisiert werden. Nur so können elektrische Lastprofile genau abgefahren werden.

Um den Versuchsstand zu Testzwecken nutzen zu können, hat außerdem eine Einbindung an die Leitwarte des Energie Campus Sinn.

# Literaturverzeichnis

- [1] ANALOG DEVICES: *4-20 mA Transmitter AD694 - Datenblatt*. 2002
- [2] BABUSCH, A. ; EBERT, T. ; KÖNIG, K.-H. ; MAKOSCHEY, T. ; MILLIES, A. ; ORASCHIEWSKI, M. ; RUDOLPH, B. ; WILO SE (Hrsg.): *Grundlagen der Pumpentechnik*
- [3] BATE, B.: *Spezialgebiet der Steuer- und Regelungstechnik: PID-Einstellregeln-Schriftliche Ausarbeitung*. 2009
- [4] BERNSTEIN, H.: *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. 2014
- [5] BORIES, C.: *Einrichtung einer intelligenten Ausleseinheit für Verbrauchsmeßzähler*. 1995
- [6] COSMO GMBH ; COSMO GMBH (Hrsg.): *LHClassic Warmwasser Luftherhitzer - Montage- und Betriebsanleitung*
- [7] ELLER, D.: *Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland: Potentiale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen*. 2015
- [8] ENERGIETEC: *Produktinformationen "M-Bus Pegelwandler für 10 Endgeräte"*. – URL <https://www.energietec.eu/m-bus-pegelwandler-fuer-10-endgeraete>. – Zugriffsdatum: 18.03.2016
- [9] ENERPIPE ; ENERPIPE (Hrsg.): *Enerheat Regelheizung (P4H): "Power to Heat" System 9KW - Bedienhandbuch*. 2015
- [10] HAASE & RUTHER ; HAASE & RUTHER (Hrsg.): *Versuchsaufbau einer Wärmeübergabestation - Ausführungsplan*. 2015
- [11] HOFFMANN, J. (Hrsg.): *Handbuch der Messtechnik: Mit 95 Tabellen*. 4., neu bearb. Aufl. 2012
- [12] ITRON ; ITRON (Hrsg.): *Integral-V UltraLite / CF-UltraMaXX V für Temperaturfühler 5,0 oder 5,2 - Montageanleitung*

- [13] ITWISSEN ; DATACOM BUCHVERLAG GMBH (Hrsg.): *SMD (surface mounted device)*. – URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/surface-mounted-device-SMD-SMD-Bauteil.html>. – Zugriffsdatum: 17.03.2016
- [14] ITWISSEN ; DATACOM BUCHVERLAG GMBH (Hrsg.): *THT through hole technology*. 2014. – URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/through-hole-technology-THT-Durchstecktechnik.html>. – Zugriffsdatum: 17.03.2016
- [15] JAGNOW, K. ; WOLFF, D. ; VERLAG DEUTSCHER WIRTSCHAFTSDIENST (Hrsg.): *Manuskript für "Der Energieberater"*. 2003. – URL [http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/nah-\\_und\\_fernwaerme.pdf](http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/nah-_und_fernwaerme.pdf). – Zugriffsdatum: 17.03.2016
- [16] LERCH, R.: *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-75727-6>
- [17] MANN, H. ; SCHIFFELGEN, H. ; FRORIEP, R.: *Einführung in die Regelungstechnik: Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software*. 11., neu bearb. Aufl. München : Hanser, 2009
- [18] OVENTROP: *"Tri-M TR" Dreiwege-Mischventile -flachdichtend- Datenblatt*. – URL [http://www.omentrop.de/%28X%281%29S%28xohopsdhjt5q2uaxo45yl5zd%29%29/de/products/hbtd/db\\_1131706\\_de.pdf](http://www.omentrop.de/%28X%281%29S%28xohopsdhjt5q2uaxo45yl5zd%29%29/de/products/hbtd/db_1131706_de.pdf). – Zugriffsdatum: 17.03.2016
- [19] OVENTROP: *„Aktor M ST“ Elektromotorische Stellantriebe (0-10 V) - Datenblatt*
- [20] SIEMENS SCHWEIZ AG: *Druckfühler: QBE2003-P.. QBE2103-P.. - Datenblatt*
- [21] UMWELT BUNDESAMT: *Anteile der Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe*. – URL <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/anteile-der-energieformen-strom-waerme-kraftstoffe>. – Zugriffsdatum: 17.03.2016
- [22] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & CO. KG: *WAGO -I/O-System 750: Modbuskommunikation zwischen WAGO Ethernet Kopplern und Controllern - Anwendungshinweis*
- [23] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & CO. KG: *WAGO-I/O-System 750: 2 AI DC ± 10 V, Single-Ended 750-476 - Handbuch*

- [24] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG: *WAGO-I/O-SYSTEM 750: 750-411 2DI 24V DC 0,2ms, Näherungsinitiator - Handbuch*
- [25] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG: *WAGO-I/O-SYSTEM 750: 753-455 4AI 4-20mA S.E. - Handbuch*
- [26] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG: *WAGO-I/O-System 750: 753-559 4-Kanal-Analogausgangsklemme DC 0-10 V - Handbuch*
- [27] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG ; WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG (Hrsg.): *WAGO-I/O-SYSTEM 750: Anbindung von Energiezählern mit M-Bus-Schnittstelle an das WAGO-I/O-SYSTEM und Bereitstellung der Zählerwerte über MODBUS - Anwendungshinweis*
- [28] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG: *WAGO-I/O-System 750: Programmierbarer Feldbuscontroller 750-880 - Schnellstartanleitung*
- [29] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG ; WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & Co. KG (Hrsg.): *WAGO-Software MODBUS-Master-Konfigurator: zur Konfiguration von MODBUS-Netzwerken in WAGO-I/O-PRO (CODESYS) - Handbuch*
- [30] WATTER, H.: *Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation ; mit 23 Tabellen.* 3., überarb. und erw. Aufl. 2013
- [31] WILO SE: *Wilo-Stratos PARA/-Z - Datenblatt*

# A. Anhang

Die Datengrundlage für alle in der Thesis dargestellten Diagramme, sowie die CoDe-Sys Projekte zur Regelung- und Steuerung des Versuchsstandes befinden sich auf der CD im Anhang.

## Berechnung der PID-Parameter Temperaturregelung

$$K_s = \frac{44,37^\circ\text{C} - 22,23^\circ\text{C}}{44,37^\circ\text{C} * 1} = 0,499$$

$$T_u = 42\text{s}$$

$$T_g = 38\text{s}$$

$$K_p = \frac{0,6 * 38\text{s} * 42\text{s} * 0,499}{1} = 1,088$$

$$T_n = T_g = 38\text{s}$$

$$T_v = 0,5 * 42\text{s} = 21\text{s}$$

## Berechnung der PID-Parameter Leistungsregelung

$$K_s = \frac{6,38\text{kW} - 3,62\text{kW}}{6,38\text{kW} * 0,4} = 1,082$$

$$T_u = 9\text{s}$$

$$T_g = 9\text{s}$$

$$K_p = \frac{0,6 * 9\text{s} * 9\text{s} * 1,082}{1} = 0,56$$

$$T_n = T_g = 9\text{s}$$

$$T_v = 0,5 * 9\text{s} = 4,5\text{s}$$

## Berechnungen zu den Abweichungen der IC-Schaltung

Raumtemperatur: 25 ° C

Toleranz der Widerstände: 1 %  $\hat{=}$  18,7  $\Omega$

$$U_b = 24,2V$$

minimale Spannung durch Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24,2v}{1097,34\Omega + 1870\Omega + 18,7\Omega} = 8,89V$$

maximale Spannung durch Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24,2v}{1097,34\Omega + 1870\Omega - 18,7\Omega} = 9,01V$$

Spannung ohne Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24,2v}{1097,34\Omega + 1870\Omega} = 8,95V$$

$$U_b = 24V$$

minimale Spannung durch Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24v}{1097,34\Omega + 1870\Omega + 18,7\Omega} = 8,82V$$

maximale Spannung durch Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24v}{1097,34\Omega + 1870\Omega - 18,7\Omega} = 8,93V$$

Spannung ohne Toleranz des Widerstandes:

$$U_{PT1000} = \frac{1097,34\Omega * 24v}{1097,34\Omega + 1870\Omega} = 8,88V$$

Widerstand1 IC-Schaltung: 1095  $\Omega$

Widerstand2 IC-Schaltung: 1097  $\Omega$

$$A = 3,9 * 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}C}$$

$$B = 5,802 * 10^{-7} \frac{1}{^{\circ}C}$$

$$T(R1C) = \frac{A - \sqrt{A^2 + 4 * B * (1 - \frac{1095 \Omega}{1000 \Omega})}}{2 * B} = 24,40^\circ C$$

$$T(R2C) = \frac{A - \sqrt{A^2 + 4 * B * (1 - \frac{1097 \Omega}{1000 \Omega})}}{2 * B} = 24,91^\circ C$$

Widerstand1 Multimeter: 1076  $\Omega$

Widerstand2 Multimeter: 1079  $\Omega$

$$T(R1M) = \frac{A - \sqrt{A^2 + 4 * B * (1 - \frac{1076 \Omega}{1000 \Omega})}}{2 * B} = 19,50^\circ C$$

$$T(R2M) = \frac{A - \sqrt{A^2 + 4 * B * (1 - \frac{1079 \Omega}{1000 \Omega})}}{2 * B} = 20,28^\circ C$$

$$\Delta T1 = T(R1C) - T(R1M) = 24,40^\circ C - 19,50^\circ C = 4,89^\circ C$$

$$\Delta T2 = T(R2C) - T(R2M) = 24,91^\circ C - 20,28^\circ C = 4,64^\circ C$$

$$\text{relativer Fehler Temperatur1: } \frac{4,89^\circ C}{19,50^\circ C} * 100\% = 25,09\%$$

$$\text{relativer Fehler Temperatur2: } \frac{4,64^\circ C}{20,28^\circ C} * 100\% = 22,87\%$$

# Versicherung über die Selbstständigkeit

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

Hamburg, 21. März 2016

Ort, Datum

Unterschrift