

Diplomarbeit – Dipl. Elektrotechniker HF

SPS-Programmierung der Wärmegruppe von Kraftwerk Göschenen AG



Abbildung 1: Heizraum nach abgeschlossenem Umbau, 05.09.2025

Diplomand:	David Teixeira
Begl. Diplomlehrer:	Andreas Holzer
Experte:	François-Michel Burgener
Fachexperte:	Stefan Bächler
Höhere Fachschule:	TEKO Luzern
Ort, Datum:	6003 Luzern, 17. September 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	5
2	Beruflicher Lebenslauf.....	7
3	Projektinitialisierung	8
3.1	Vorprojekt.....	8
3.1.1	Vorarbeiten.....	8
3.1.2	Abgrenzung	9
3.2	Projektauftrag.....	10
3.2.1	Bewertungsraster	11
3.3	Auftragsklärung.....	12
3.4	Analyse der Ausgangslage	14
3.4.1	Problemfelder der Projektaufgabenstellung	14
3.4.2	Herausforderungen und potenzielle Risiken	15
3.4.3	Software CAExPlus	16
3.4.4	Anlagentechnik der Wärmegruppe.....	18
3.4.5	Offertengrundlage und Budget.....	28
3.4.6	Fazit.....	30
3.5	Ideenfindung	31
3.6	Projektvertrag.....	32
3.6.1	Zielscheibe	36
4	Projektplanung	37
4.1	Projektstrukturplanung	38
4.2	Projektablaufplanung	39
4.2.1	Gantt-Diagramm.....	39
4.2.2	CKW Projektphase	40
4.2.3	Netzplan	41
5	Projektrealisierung	42
5.1	SPS-Steuerung nach CKW Richtlinie	43
5.1.1	TI_I_BS	44
5.1.2	TI_I_AS	47
5.1.3	TI_V_RG	53
5.1.4	TI_V_ES	62

5.1.5	TI_O_SV.....	76
5.2	Offline-Tests.....	79
5.3	Simulation	80
5.3.1	Aufbau	80
5.3.2	Tests.....	81
5.3.3	Resultate	82
5.4	Inbetriebnahmen vor Ort.....	83
5.4.1	Reaktion Elektrodurchlauferhitzer	84
5.4.2	Mischventil Elektrodurchlauferhitzer.....	84
5.4.3	Begrenzungsregler	88
5.4.4	Mischventil Heizgruppe Betriebsgebäude	90
6	Pilot Umstellung auf Funktionales Engineering.....	91
6.1	Kreativitätsmethode «SCAMPER»	92
6.1.1	Priorisierungsmethode «Eisenhower-Matrix».....	93
6.2	Variantenbildung	94
6.2.1	Kurzbeschreibung Variante «Alle guten Dinge sind EVA».....	94
6.2.2	Kurzbeschreibung Variante «Funktionen, die Funktionieren»	95
6.2.3	Kurzbeschreibung Variante «Alle für einen, Funktionen für alle»	96
6.3	Evaluation der geeignetsten Variante	97
6.3.1	Variantenbewertung Kriterien.....	97
6.4	Präferenzmatrix.....	99
6.5	Nutzwertanalyse	99
6.6	Ergebnis aus Präferenzmatrix und Nutzwertanalyse	100
6.7	Sensitivitätsanalyse	101
6.7.1	Präferenzmatrix Sens.....	101
6.7.2	Nutzwertanalyse Sens.....	101
6.7.3	Ergebnis aus Sensitivitätsanalyse.....	102
6.8	Ausarbeitung der Variante «Funktionen, die funktionieren»	103
6.9	«Funktionen, die funktionieren» ausgearbeitet.....	103
6.9.1	Funktionsanalyse Wärmegruppe.....	103
6.9.2	Layout.....	104
6.9.3	Abarbeitungsreihenfolge	108
6.9.4	Bezeichnung der verschiedenen Variabeln.....	108
6.10	SWOT-Analyse	110
6.10.1	Entscheid mit sachlogischer Begründung	111

7	Projektabschluss	112
7.1	Projektüberwachung	112
7.1.1	Ablaufplanung - Soll / Ist-Überwachung	113
7.1.2	Fazit Ablaufplanung	114
7.2	Zeitaufwand	114
7.2.1	Fazit Zeitaufwand	118
7.3	Evaluation der Zielerreichung	118
7.3.1	Fazit Evaluation der Zielerreichung	120
7.4	Lessons Learnt	121
7.4.1	Reflexion	121
8	Redlichkeitserklärung	123
9	Abbildungsverzeichnis	124
10	Tabellenverzeichnis	126
11	Diagrammverzeichnis	127
12	Literaturverzeichnis	128
13	Anhang	129

1 Management Summary

Diese Diplomarbeit beschreibt die Entwicklung einer SPS-Steuerung für die Wärmegruppe der Kraftwerk Göschenen AG. Ziel war ein zuverlässiges, übersichtliches und normgerechtes Steuerungsprogramm, das die Wohnkolonie und das Betriebsgebäude rechtzeitig vor Beginn der Heizperiode im September sicher mit Wärme versorgt. Die bereits vor Projektstart erstellte Betriebsanleitung diente als fachliche Grundlage; sie definiert die Anforderungen und das Sollverhalten der Anlage. Darauf basierend wurde die Steuerung in Funktionsbausteinsprache in CAExPlus umgesetzt. Die Validierung erfolgte schrittweise mittels Offline-Tests und Simulationen sowie im Rahmen der Inbetriebnahme vor Ort. Festgestellte Abweichungen wurden gemeinsam mit dem Betreiber geklärt und unmittelbar in die Software übernommen. Mit der Einbindung der Steuerung in das Leitsystem (SCADA) werden Transparenz, Regelgüte und Diagnosefähigkeit verbessert.

Ausgangslage

Die bestehende Wärmegruppe deckte den Grundbedarf, wies jedoch in den Übergangsmo-
naten deutliche Schwächen im Betrieb der Wärmepumpe auf. Mangels Modulationsfähig-
keit durch nur eine Leistungsstufe kam es bei Teillast häufig zu Taktbetrieb, was Effizienz,
Komfort und Anlagenverschleiss negativ beeinflusste. Der Elektrodurchlauferhitzer war als
Redundanz zuverlässig, konnte die fehlende Abstufbarkeit der Wärmepumpe jedoch nicht
kompensieren. Zusätzlich erschwerten eine zugekaufte Black-Box-Lösung und die fehlende
durchgängige Einbindung in das Leitsystem (SCADA) die zentrale Bedienung, Alarmierung,
Trenddarstellung und Diagnose. Die neue Auslegung adressiert diese Punkte: Zwei
Wärmepumpen mit je zwei Leistungsstufen ermöglichen eine bedarfsgerechte, feinere Lei-
stungsanpassung und reduzieren Taktbetrieb deutlich. Der Elektrodurchlauferhitzer bleibt
als zusätzliche Redundanz- und Wartungsoption erhalten.

Vorgehen

Zu Beginn wurden die Anforderungen aus der Betriebsanleitung konkretisiert, die
notwendigen Steuerungsfunktionen abgeleitet und eine klare Zielarchitektur definiert.
Parallel erfolgte die Einarbeitung in CKW-spezifische Arbeitsweisen, Makrobibliotheken
und das Engineering-Werkzeug CAExPlus unter fachlicher Begleitung der Leittechnik.
Daraus entstand eine einheitliche Programmiermethodik mit Namenskonventionen,
Diagnosekonzept und Teststrategie. Ein detaillierter Projektstruktur- und Ablaufplan
definierte Meilensteine für Umsetzung, Test und Inbetriebnahme und diente als Grundlage
für Ressourcen- und Terminsteuerung.

Die Implementierung startete mit der Modellierung der Grundfunktionen in Funktionsbausteinsprache und der Vorbereitung des Datenpunkttests. Sämtliche Ein- und Ausgänge wurden in CAExPlus vollständig abgebildet und technisch integriert, damit der Datenpunkttest frühzeitig erfolgen konnte. Die fachliche Zuordnung der Ein- und Ausgänge sowie Signalbenennungen wurden durch Teammitglieder vorbereitet; darauf aufbauend erfolgten Umsetzung und Integration. Im Anschluss wurden der übergeordnete Regler, der Elektrodurchlauferhitzer und die Heizgruppe der Wohnkolonie umgesetzt und schrittweise vor Ort in Betrieb genommen. Lieferengpässe bei den Wärmepumpen erforderten eine Umplanung; Heizgruppen des Betriebsgebäudes und des Dachstocks wurden vorgezogen, programmiert und in Betrieb gesetzt, der Montageturm folgte. Umfangreiche Offline-Tests und Simulationen flankierten die Arbeiten, um die verschobene Wärmepumpen-Inbetriebnahme methodisch abzusichern und die Inbetriebnahmezeit am Projektende zu verkürzen. Iterative Korrekturen erfolgten in kurzen Abstimmungsschleifen mit dem Betreiber; festgestellte Abweichungen wurden unmittelbar in der Software korrigiert und dokumentiert.

Im Rahmen des Projekts wurde zudem ein Pilot zum Funktionalen Engineering umgesetzt, um Arbeitsmethodik, Funktionen und Steuerungslogik modular, standardisiert und wiederverwendbar zu gestalten. Ziel war die Vereinfachung zukünftiger Anpassungen und eine effizientere Projektabwicklung.

Ergebnisse

Seit der Inbetriebnahmewoche KW 34 (18.08.–22.08.) versorgt der Elektrodurchlauferhitzer die Heizgruppe der Wohnkolonie sowie das Betriebsgebäude und den Dachstock zuverlässig mit Wärme. Die Software wurde in mehreren Iterationsschleifen geprüft, korrigiert und optimiert. Die Simulation zeigt, dass die spätere Wärmepumpen-Inbetriebnahme zügig und mit reduziertem Risiko erfolgen kann. Zusätzlich wurde der Pilot zum Funktionalen Engineering erarbeitet, der als Grundlage für künftige Standardisierung und Entscheidungsfindung in weiteren Projekten dient.

Ausblick

Als nächster Schritt werden die beiden Wärmepumpen in Betrieb genommen und in einer Probetriebsphase feinjustiert, um Regelstrategie und Betriebsparameter anhand realer Daten zu optimieren. Parallel wird der Pilot zum Funktionalen Engineering ausgewertet, um daraus Verbesserungen für kommende Projekte abzuleiten.

2 Beruflicher Lebenslauf

Ich wurde am 8. November 1999 geboren und bin ein engagierter Techniker mit breiter Praxiserfahrung in der Schemaerstellung, im Engineering, in der Bahnautomation, in der Datenbankpflege sowie in der Automatisierung von Unterwerken und Unterstationen. Ergänzend bringe ich fundierte Kenntnisse in der Montage und Verdrahtung von Schaltschränken sowie in Installationsarbeiten auf Baustellen mit. Durch diese Einsätze habe ich mir ein ganzheitliches technisches Verständnis erarbeitet, das es mir ermöglicht, Projekte strukturiert, effizient und lösungsorientiert umzusetzen.



Meine berufliche Laufbahn begann nach der Lehre als Automatikmonteur EFZ (08/2015–07/2018) bei der Login Berufsbildung AG mit mehreren temporären Einsätzen im Montagebereich. Bei der Sealed Air GmbH (08/2018–01/2019 und 04/2019–07/2019) war ich für die Montage und Verdrahtung industrieller Vakuumiermaschinen des Typs CRYOVAC verantwortlich und unterstützte die Einführung neuer Arbeitsmethoden sowie die Einarbeitung neuer Mitarbeitender. Im Juli 2020 wechselte ich zur Schweizer Electronics AG (07/2020–10/2020) und übernahm die Verdrahtung, Montage und Prüfung des Flex-Bahnübergangssystems.

Von November 2020 bis März 2024 arbeitete ich bei der Bär Bahnsicherung AG, die seit September 2022 zur Stadler Signalling AG gehört. Dort entwickelte ich mich zum Hardware Engineer für das elektronische Stellwerk EUROLOCKING. Zu meinen Aufgaben zählten die Entwicklung sicherheitsrelevanter Hardwarelösungen, die Unterstützung technischer Projektleitender, die Planung und Durchführung kleinerer Projekte, die Montage und Prüfung von Schaltschränken sowie ein sechswöchiger Auslandseinsatz in Bolivien. In dieser Zeit vertiefte ich mich in die Schemaerstellung und die Datenbankpflege in EPLAN sowie die vollständige Erneuerung des Elektroschemas.

Parallel zu meiner Berufstätigkeit absolviere ich seit 2022 die berufsbegleitende Weiterbildung zum Dipl. Elektrotechniker HF an der TEKÖ Luzern. Diese Weiterbildung ergänzt meine praktische Erfahrung um vertiefte theoretische Grundlagen und stärkt mein Profil im Engineering.

3 Projektinitialisierung

Die Projektinitialisierung markiert den verbindlichen Start und legt das Fundament für eine zielgerichtete Umsetzung. In dieser Phase werden Projektauftrag und -ziele klar und messbar definiert, die Ausgangslage komprimiert analysiert und zentrale Rahmenbedingungen festgelegt. Dadurch werden Erwartungen synchronisiert, potenzielle Risiken frühzeitig erkannt und die Basis für Planung, Steuerung und Qualitätssicherung geschaffen. Ergebnis ist ein genehmigter Projektauftrag beziehungsweise Projektvertrag als gemeinsame Referenz für Umfang, Zeit, Kosten und Qualität. Auf dieser Grundlage erfolgt das formale Kick-off; die weitere Planung kann fokussiert gestartet, der Fortschritt transparent verfolgt und bei Bedarf frühzeitig korrigiert werden.

3.1 Vorprojekt

Dieses Kapitel dokumentiert die vorbereitenden Arbeiten und Klärungen, die vor Beginn der eigentlichen SPS-Programmierung durchgeführt wurden. Ziel ist, die Rahmenbedingungen transparent darzustellen und den eigenen Beitrag klar vom Gesamtprojekt abzugrenzen.

3.1.1 Vorarbeiten

Die folgenden grundlegenden Vorarbeiten wurden durch das Team CKW-NESL, insbesondere durch Stefan Bächler und Peter Ulrich, erbracht:

- Erstellung einer Kostenabschätzung für das Gesamtprojekt.
- Auswahl, Dimensionierung und Bestellung der SPS-Hardware.
- Ausarbeitung der Betriebsanleitung als technische und funktionale Grundlage.
- Definition und Abstimmung der Schnittstellen mit dem Engineering, insbesondere für das Elektroschema.
- Festlegung von Signalnamen und Langtexten in SICAM TOOLBOX II.
- Parametrierung der SPS-Belegung in SICAM TOOLBOX II.
- Definition der zu verwendenden Makros in CAExPlus.
- Erstellung und Konfiguration der Visualisierungsoberfläche.

Diese vorbereitenden Schritte bilden die konzeptionelle und technische Basis für die SPS-Programmierung und sichern die reibungslose Integration in das Gesamtprojekt.

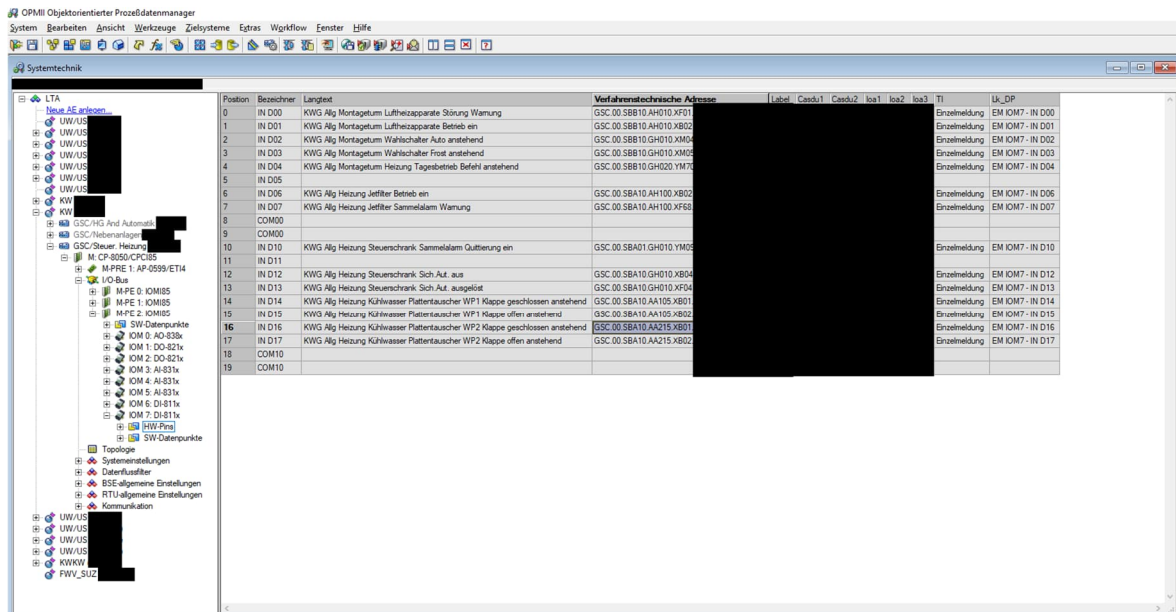


Abbildung 2: OMP2, vorbereitete Belegung

3.1.2 Abgrenzung

Der Fokus liegt auf der SPS-Programmierung in CAExPlus nach CKW-Richtlinien. Der Aufgabenbereich umfasst:

- Entwicklung und Implementierung der SPS-Programmierung in CAExPlus (Funktionsbausteinsprache).
- Erstellung und Integration einer Simulation in CAExPlus.
- Unterstützung bei der Inbetriebnahme, ausgenommen die eigentliche Inbetriebnahme der Wärmepumpen.
- Mitwirkung bei Reglerfeinjustierung und Optimierung der Steuerung.
- Unterstützung bei Anpassung und Pflege der Betriebsanleitung.
- Dokumentation aller selbst erstellten Makros und deren Funktionsweise.
- Entwicklung und Umsetzung eines Piloten für funktionales Engineering.

Nicht Teil sind die im Abschnitt Vorarbeiten aufgeführten Leistungen sowie weitere Arbeiten anderer Beteiligter (z. B. Gesamtprojektplanung, Elektroschema, Umbau Heizgruppe und Schaltschrank). Der Datenpunktttest wurde von Peter Ulrich übernommen.

3.2 Projektauftrag



Die Themeneingabe kann als Word-Formular im Extranet unter „Praktika“ heruntergeladen werden.

Themeneingabe Diplomarbeit

Name	Teixeira
Vorname	David
Adresse, Ort	Bernstrasse 78, 6003 Luzern
Tel: P, G	076 399 12 19
E-Mail	david.teixeira@edu.teko.ch / davidteixeira199@hotmail.com
Klasse	L-TEL-22-Do-a
Fachgebiet	Dipl. Elektrotechniker/in HF
Auftraggeber	CKW AG

Thema	SPS Programmierung der Wärmegruppe von Kraftwerk Göschenen AG
Kurzbeschreibung	Die bestehende Wärmepumpenanlage des Kraftwerks Göschenen wird umfassend modernisiert. Die derzeit installierte Wärmepumpe sowie die zugehörige Steuerungstechnik sind veraltet und entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Geplant ist der Ersatz durch zwei moderne, leistungsfähige Wärmepumpen, eine neue, zeitgemässe Steuerungseinheit sowie eine erweiterte Messtechnik, darunter Temperaturfühler, Drosselventile und weitere Komponenten zur Regelung und Überwachung des Betriebs. Das rund 20 °C warme Kühlwasser, das von den sechs Generatoren im Kraftwerk Göschenen anfällt, soll künftig den neuen Wärmepumpen zugeführt werden, um dessen energetisches Potenzial vor dem Ableiten in das Ausgleichsbecken Göschenen effizient zu nutzen. Die neu konfigurierte Wärmegruppe dient sowohl der Beheizung des Betriebsgebäudes im Kraftwerk Göschenen als auch der Versorgung eines nahegelegenen Wärmeverbunds, der etwa fünf Wohnhäuser umfasst. Durch diese Massnahme wird nicht nur der Energieverbrauch optimiert, sondern auch ein Beitrag zur nachhaltigen Ressourcennutzung geleistet. Da das Projekt idealerweise noch vor Beginn der Heizperiode abgeschlossen sein soll, ist eine vorausschauende Planung sowie die Entwicklung einer realitätsnahen Simulation vorgesehen. Diese soll es ermöglichen, die Steuerungslogik bereits vor der physischen Inbetriebnahme zu testen und zu validieren, um eine zügige und reibungslose Inbetriebnahme sicherzustellen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines zuverlässigen, übersichtlichen und normkonformen SPS-Programms vorgesehen, das die Wärmepumpenanlage effizient und betriebssicher steuert. Die Programmierung erfolgt gemäss der Norm IEC 61131 und den geltenden CKW-Richtlinien und muss vollständig mit dem bestehenden Leitsystem des Kraftwerks Göschenen kompatibel sein, sodass eine nahtlose Integration und Überwachung gewährleistet ist. Darüber hinaus beinhaltet die Diplomarbeit auch die Mitarbeit bei der Erstellung einer verständlichen und praxisorientierten Betriebsanleitung sowie die grafische Aufbereitung und Integration der notwendigen Bilder und Visualisierungselemente für die Simulation. Als Endergebnis dieser Arbeit liegt ein vollständig getestetes, dokumentiertes und betriebsbereites SPS-Programm vor. Die Steuerung wird mit einer Off-line-Simulation validiert, sodass eine verkürzte Inbetriebnahme möglich ist.
Erfolgskriterien	• Es liegt eine vollständig umgesetzte SPS-Programmierung vor, nach der Norm IEC 61131, die mehrheitlich in der Funktionsbausteinsprache realisiert wurde. • Die Wärmepumpensteuerung ist vollständig in das bestehende Leitsystem des Kraftwerks Göschenen integrierbar. • Sämtliche im Projekt eingesetzten Sensoren und Aktoren liefern korrekte Werte, die in der Steuerung verarbeitet und über das Leitsystem ausgelesen werden können. • Die Simulation bildet die spätere Steuerungslogik soweit als sinnvoll ab und ermöglicht eine verkürzte Inbetriebnahme. • Die Inbetriebnahmebereitschaft und die erfolgreiche Durchführung der Simulation sind bis spätestens 1. September 2025 erreicht.

Abbildung 3: Projektauftrag

3.2.1 Bewertungsraster



BEURTEILUNG DIPLOMARBEIT

Name des Diplomanden: _____

Abteilung/Klasse: _____

Bemerkungen	Abzug
1. Schwierigkeitsgrad	
Höhe des Schwierigkeitsgrades	
2. Projektinitialisierung und -planung	
2.1 Themenbeschreibung	
2.2 Pflichtenheft / Aufgabenabgrenzung / PSP	
2.3 Zielformulierung / Erfolgskriterien	
2.4 Ablaufplanung	
Mangelpunkte:	
3. Realisierung	
3.1 Analyse, Informationssammlung	
3.2 Lösungsweg / Variantenfindung	
3.3 Begründung der Varianten resp. Lösung	
3.4 Berechnungen / Wirtschaftlichkeit	
3.5 Kontrolle Zielerreichung	
3.6 Reflektion (lessons learnt)	
Mangelpunkte:	
4. Dokumentation	
4.1 Gliederung, Aufbau	
4.2 Darstellung	
4.3 Verständlichkeit	
4.4 Anhang (Quellenangaben etc.)	
4.5 Inhaltliche Vollständigkeit	
Mangelpunkte:	
5. Begleitung / Präsentation	
5.1 Arbeitsweise (Termine, etc.)	
5.2 Auftreten, Rhetorik, Verständlichkeit	
5.3 Inhalt	
5.4 Beantwortung der Fragen	
5.5 Zeitverwaltung	
Mangelpunkte:	
6. Onlinepublikation	
5.1 Inhalt	
5.2 Verständlichkeit	
5.3 Ausgestaltung	
Mangelpunkte:	
TOTAL Abzug:	
Kompetenzprofil	
Diplomnote	

Name und Unterschrift des Diplomlehrers: _____

Name und Unterschrift des Diplomexperten: _____

Ort, Datum: _____

Abbildung 4: Bewertungsraster

3.3 Auftragsklärung

Die Auftragsklärung fand am 05.08.2025 statt; die Fragen wurden von Stefan Bächler beantwortet. Nachfolgend sind die Fragen in schwarzer Schrift und die zugehörigen Antworten in grüner Schrift dargestellt.

1. Was sind die Mindestanforderungen an die Dokumentation eines selbst erstellten Makros?

Beschreibung innerhalb des Makros sind mit Bemerkungen und einer kleinen übergeordneten Beschreibung zu versehen. Makros, welche in die CKW-Bibliothek aufgenommen werden, müssen mit einem Word Dokument, gemäss CKW-Standard dokumentiert werden. Das Word Dokument beschreibt die Ein-/Ausgänge und die Funktion des Makros und liefert allfällige Anwendungshinweise. Die Beschreibung ist auch als Bausteinhilfe in das Tool CAExPlus zu integrieren.

2. Werden die Simulationen dokumentiert? Wenn ja, was muss die Dokumentation enthalten?

Die Funktion Simulation muss dokumentiert werden. Es ist zu beschreiben welche Eingänge werden wie simuliert.

Ebenso müssen die durchgeführten Simulationen beschrieben und die Ergebnisse der Simulationen mit entsprechenden Diagrammen dokumentiert werden.

3. Wie ist das Layout bzw. der Stil der Bilder und Visualisierungselemente für die Simulation vorgesehen? Gibt es Vorlagen oder Beispiele aus früheren Projekten?

Für die Simulation sind keine Visualisierung bzw. Bildelemente auf dem SCADA System vorgesehen. Die Simulation erfolgt ausschliesslich durch Offline-Simulation im Tool CAExPlus.

4. In welchem Rahmen ist meine Mitarbeit an der Betriebsanleitung vorgesehen?

Die Betriebsanleitung wurde primär mit dem Betrieb erarbeitet. Die Mitarbeit beschränkt sich auf die Beantwortung von offenen Fragen und die Finalisierung bei Projektende.

5. Sind kleinere oder grössere Abweichungen von den CKW-Richtlinien nach Absprache möglich? Falls ja, welche Art von signifikantem Mehrwert wäre dafür notwendig?

Es sind Abweichungen zum CKW-Standard möglich, sofern sie von einem signifikanten Mehrwert für CKW sind und die Projekttermine nicht gefährden. Angesichts des engen Zeitrahmens sind Abweichungen zum CKW-Standard eher unwahrscheinlich.

6. Welche Softwareteile müssen spätestens bis zum 01.09.2025 abgeschlossen sein?

Bis zum 01.09.2025 müssen mindestens folgende Softwareteile realisiert und geprüft bzw. in Betrieb genommen sein:

- I/O Verarbeitungen
- Wärmespeicher (3 Tanks)
- Elektrodurchlauferhitzer
- Wärmegruppe Wohnkolonie

7. Welche Softwareteile müssen mindestens simuliert werden?
Es müssen zur Qualitätsprüfung zumindest kleinere Teilfunktionen simuliert werden.
8. Wie wird die Software validiert? Gilt beispielsweise das Vier-Augen-Prinzip?
Die Funktionen werden im Vier Augenprinzip auch mit CKW und dem Anlagenbetreiber geprüft.
9. Bei welchen Inbetriebsetzungen ist ein Mitwirken (Begleiten oder Mitarbeiten) besonders erwünscht?
In der Phase der Funktionsprüfungen ist vorwiegend ein Mitwirken erwünscht.
10. Können die von mir erstellten Makros auch in die CKW-Bibliothek aufgenommen und in anderen Projekten verwendet werden?
Selbstverständlich sollen Makros, welche auch in anderen Projekten verwendbar sein könnten, in die CKW-Bibliothek aufgenommen.
11. Wie ist die Betreuung während der Diplomarbeit organisiert? Gibt es regelmässige Feedbackgespräche oder Meilensteine?
Die Betreuung erfolgt über den Projektverantwortlichen Stefan Bächler. Es sind wöchentliche Projektsitzungen definiert, bei welchen die Ziele und den Projekterfolg behandelt werden.
12. Woran wird der Erfolg des Projekts gemessen? Gibt es definierte Zielgrössen oder Bewertungskriterien?
Die Zielgrössen sind die Einhaltung der Meilensteine und eine weitgehend funktionierende Steuerung gemäss den Vorgaben der Betriebsanleitung.

3.4 Analyse der Ausgangslage

Die Analyse betrachtet den Umgang mit der SPS-Programmierung in CAExPlus und die daraus resultierenden technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Behandelt werden Problemfelder der Aufgabenstellung, Herausforderungen und Risiken, die Software CAExPlus, die Anlagentechnik der Wärmegruppe sowie Offertengrundlage und Budget. Die Ergebnisse bilden die Basis für Planung und Umsetzung.

3.4.1 Problemfelder der Projektaufgabenstellung

Die folgenden Problemfelder wurden identifiziert:

Unklare Zielsetzung: Uneindeutig formulierte oder unterschiedlich interpretierte Ziele führen zu Missverständnissen.

Unzureichende Ressourcen: Fehlende Zeit, ungenügendes Personal oder mangelnde technische Unterstützung erschweren die Durchführung.

Unrealistischer Zeitplan: Zu enge Termine erzeugen Druck, Überlastung und mindern die Qualität.

Unzureichende Kommunikation: Unklare oder unregelmässige Abstimmungen verursachen Informationsverluste und verzögerte Entscheidungen.

Fehlende Erfolgskriterien: Ohne klare Messgrössen fehlt Orientierung; dies mindert die Motivation.

Unklare Prioritäten: Nicht priorisierte Aufgaben führen zu Verzögerungen.

Technologische Herausforderungen: Neue oder wenig bekannte Software (z. B. CAExPlus) birgt Risiken aufgrund fehlender Erfahrung.

Abhängigkeiten von Drittparteien: Verzögerungen bei Zulieferern, Partnern oder Behörden wirken sich unmittelbar aus.

3.4.2 Herausforderungen und potenzielle Risiken

Aus der erstmaligen praktischen Umsetzung in einer realen Firmenumgebung ergeben sich technische, inhaltliche und organisatorische Risiken:

Fehler in der Steuerungs- und Funktionslogik: Begrenzte Erfahrung in der SPS-Programmierung, insbesondere in der Verfahrenstechnik von Heizungsanlagen, kann zu Programmfehlern führen. Selbsterstellte Bausteine müssen ggf. mehrfach überarbeitet werden; Probleme zeigen sich oft erst in Tests, Simulation oder Inbetriebnahme.

Neue Tools und Normen: CAExPlus unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von anderen Systemen; die Norm IEC 60870 erfordert zusätzliche Einarbeitung.

Einzigkeit des Projekts: Für die Wärmegruppe existiert kein direkt vergleichbares Referenzprojekt.

Veränderungen im Projektumfang: Die Betriebsanleitung ist noch nicht final; offene Punkte werden sukzessive geklärt und können zu Ergänzungen oder Anpassungen führen.

Abhängigkeit von der Inbetriebnahmereihenfolge: Die Software muss etappenweise passend zu den Inbetriebnahmeschritten fertiggestellt und geprüft sein.

Risikominderung und Vorgehen

- Strukturierte Planung mit klaren Meilensteinen, Abnahmekriterien und Pufferzeiten.
- Enge Abstimmung mit Auftraggeber, Betreiber und Fachkolleginnen/-kollegen; schnelle Klärung offener Punkte.
- Frühzeitige, iterative Tests (Modultests, Simulation, Prüfprotokolle), um Fehler vor der Inbetriebnahme zu erkennen.
- Gezielte Einarbeitung in CAExPlus und relevante Normen (z. B. IEC 61131-3, IEC 60870); Nutzung von Best Practices und internen Templates.
- Konsequenter Versionsverwaltung und Änderungsmanagement mit Anforderungsnachverfolgung.
- Laufende, sorgfältige Dokumentation sowie regelmässige Fortschrittskontrollen und Reviews.

Dieses Vorgehen reduziert Verzögerungen, Mehrarbeit und Fehlerwahrscheinlichkeit, erhöht Transparenz und verbessert die Voraussetzungen für eine termingerechte, qualitativ hochwertige Inbetriebnahme sowie einen stabilen Übergang in den Regelbetrieb.

3.4.3 Software CAExPlus

CAExPlus ist ein zentrales Engineering-Modul innerhalb der Siemens-Umgebung SICAM TOOLBOX II für die grafische Erstellung, Simulation und Inbetriebnahme von Steuerungs- und Regelungsfunktionen. Die Umsetzung erfolgt gemäss IEC 61131-3; mit der Funktionsbausteinsprache lassen sich Steuerungslogiken modular und strukturiert abbilden.

Projekte werden in SICAM TOOLBOX II angelegt, konfiguriert und dokumentiert; CAExPlus übernimmt die Logikerstellung. Der grafische Editor macht Signalflüsse, logische Verknüpfungen und Ablaufsteuerungen nachvollziehbar, was Entwicklung, Fehlersuche und Anpassungen erleichtert.



Abbildung 5: TOOLBOX II, Startfenster

Für die Qualitätssicherung stehen unter anderem folgende Funktionen zur Verfügung: Überwachung und gezielte Veränderung von Variablenwerten im Offline-Test, Breakpoints und Force Marker für schrittweise Analysen, integriertes Oszilloskop zur Prozessdatenaufzeichnung sowie Prüfungen von Kommunikationssignalen. Automatische Plausibilitätsprüfungen erkennen unverbundene Ein-/Ausgänge, doppelt belegte Variablen oder unpassende Datentypen frühzeitig.

In vielen Projekten werden ergänzend Normen wie IEC 60870-5 für Fernwirkprotokolle berücksichtigt. Zusammen mit weiteren Komponenten der SICAM TOOLBOX II unterstützt CAExPlus damit einen durchgängigen Workflow von der Konzeption über die Parametrierung bis zur Diagnose.

3.4.4 Anlagentechnik der Wärmegruppe

Für die Programmierung ist ein strukturiertes Verständnis der Komponenten, ihrer Aufgaben und funktionalen Zusammenhänge erforderlich. Der Fokus liegt auf den für die SPS-Programmierung relevanten Schnittstellen und Betriebszuständen.



Abbildung 7: Heizraum während des Umbaus, 22.08.2025



Abbildung 8: SICAM A8000 im Schaltschrank, unterhalb der Sicherungen

3.4.4.1 Wärmepumpen

Wärmepumpen nutzen Umgebungswärme, heben das Temperaturniveau und stellen die Energie für Heizung, Warmwasser oder Kühlung bereit. Ein Kältemittelprozess umfasst Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger und Expansionsventil. Die Effizienz wird über den COP sowie saisonal über den SCOP bewertet; moderne Anlagen erreichen typischerweise SCOP-Werte im Bereich von 3 bis 5. Für die Steuerung sind insbesondere Betriebsarten (Leistungsstufen), Vorlauftemperaturregelung, Freigaben sowie Schutz- und Grenzwertüberwachungen relevant.



Abbildung 9: Neue Wärmepumpe während des Umbaus, 05.09.2025

3.4.4.2 Elektrodurchlauferhitzer

Der Elektrodurchlauferhitzer erwärmt Wasser bedarfsgerecht im Durchfluss und eignet sich als Redundanz, zur Spitzenlastabdeckung oder temporär während Revisionen. Moderne, leistungsgeregelte Geräte sind betrieblich effizient, jedoch energetisch weniger vorteilhaft als Wärmepumpen, da keine Umweltwärme genutzt wird. Für die SPS sind Sollwertvorgaben, Leistungsstufen beziehungsweise Modulation, Temperatur- und Durchflusssensoren sowie Sicherheitsketten (z. B. Trockenlaufschutz, Übertemperatur) zu integrieren.



Abbildung 10: Bestehender Elektrodurchlauferhitzer

3.4.4.3 Mischventile

Mischventile kombinieren Flüssigkeitsströme unterschiedlicher Temperatur zu einem definierten Austrittstemperaturniveau und dienen der Anpassung der Vorlauftemperatur an die Anforderungen einzelner Heizkreise. Häufig eingesetzt werden thermostatische Mischventile sowie 3-Wege-Mischer; bei 4-Wege-Mischern lassen sich Vor- und Rücklauf gleichzeitig beeinflussen. Für die Regelung sind Stellgrösse, Rückmeldung der Ist-Temperatur, geeignete Regelstrategien, Fail-safe-Stellungen und Stellzeitparameter zu berücksichtigen.

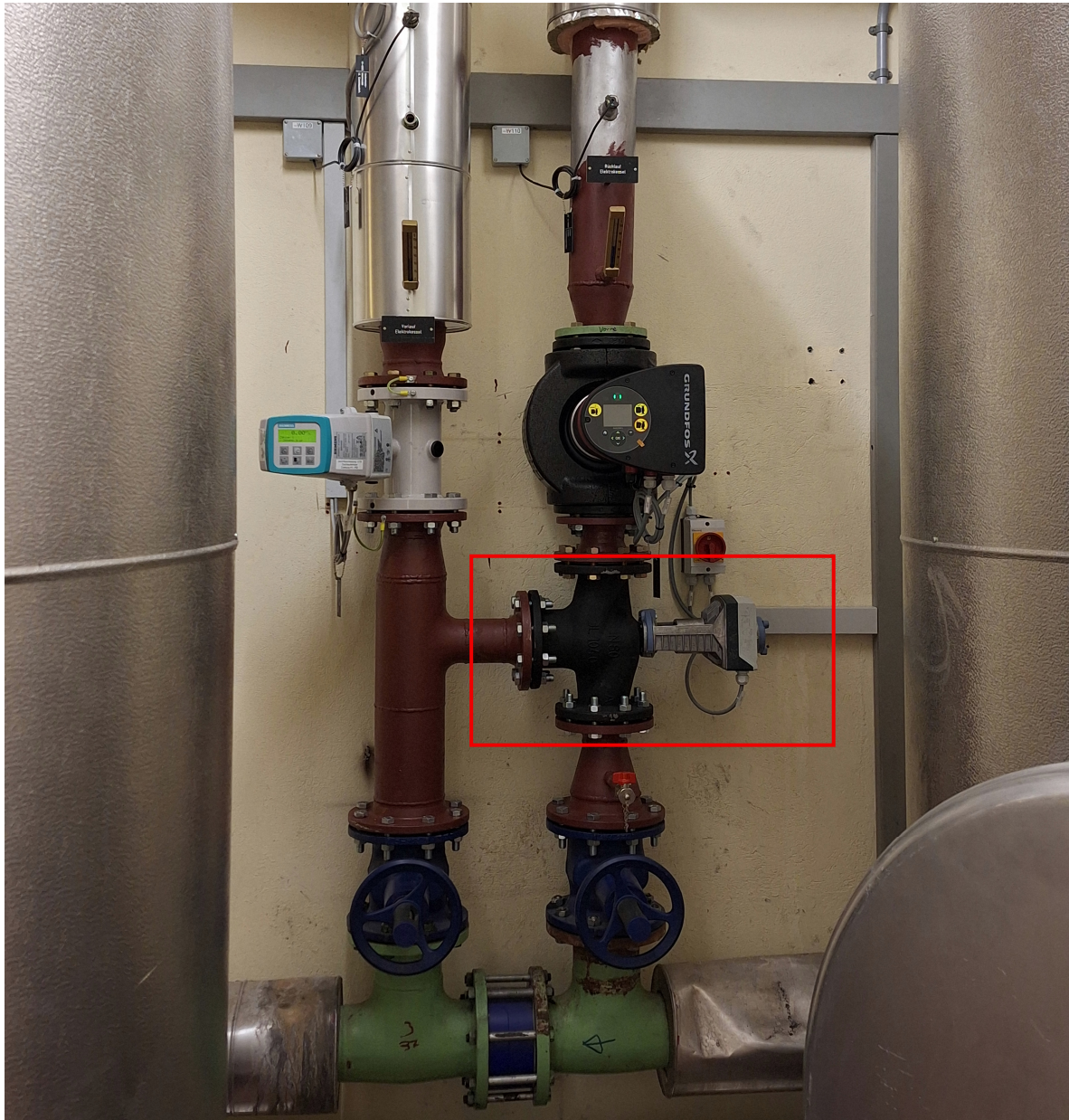


Abbildung 11: Neues Mischventil am Elektrodurchlauferhitzer

3.4.4.4 Umwälzpumpen

Umwälzpumpen stellen in Heizungs-, Kühl- und Warmwassersystemen den erforderlichen Volumenstrom bereit und überwinden die hydraulischen Widerstände der Rohrleitungen und Komponenten. Unterschieden werden Nassläuferpumpen (kompakt, leise, im Fördermedium gekühlt) und Trockenläuferpumpen (für höhere Förderleistungen und Drücke). Moderne Pumpen sind drehzahl geregelt und können differenzdruck- oder temperaturgeführt betrieben werden. Aus Sicht der SPS sind insbesondere Betriebsfreigabe, Sollwertvorgaben (z. B. Drehzahl oder Differenzdruck), Rückmeldungen (Betrieb, Störung), Schutzfunktionen (z. B. Trockenlauf, Überlast) sowie die Abstimmung mit Ventilen und Verbrauchern zur Vermeidung ungünstiger Betriebspunkte zu berücksichtigen.



Abbildung 12: Neue Umwälzpumpen

3.4.4.5 Wärmespeicher

Wärmespeicher nehmen thermische Energie auf, speichern sie und geben sie zeitversetzt wieder ab. In der Gebäudetechnik werden überwiegend sensible Speicher (Pufferspeicher, häufig mit Schichtladeprinzip) eingesetzt, um Erzeugung und Verbrauch zu entkoppeln, Lastspitzen zu kappen und die Erzeuger effizienter zu betreiben. Steuerungsseitig sind der Speicherladestand beziehungsweise repräsentative Speichertemperaturen (z. B. über Schichtfühler), Lade- und Entladefreigaben, Prioritäten gegenüber Direktverbrauchern sowie Schutzfunktionen (Temperaturgrenzen) zu berücksichtigen. Eine saubere Einbindung reduziert die Taktrate von Wärmeerzeugern und verbessert die Gesamteffizienz.



Abbildung 13: Drei bestehende Wärmespeicher, 6000 L je Speicher

3.4.4.6 Kühlwassertanks

Kühlwassertanks puffern und bevorraten Kühlmedien in Kreisläufen, die Wärme aus Anlagen oder Prozessen aufnehmen und über Wärmetauscher, Kühltürme oder andere Senken abgeben. Der Tank stabilisiert Temperaturniveau und Volumenstrom und erhöht damit die Betriebssicherheit. Für die SPS-Integration sind Füllstandsüberwachung, Temperaturmessung und gegebenenfalls die Stufung der zugehörigen Pumpen relevant.



Abbildung 14: Bestehende zwei Kühlwassertanks mit Füllstandsüberwachung

3.4.4.7 Ausdehnungsgefäss

Das Ausdehnungsgefäss kompensiert Volumenänderungen des Heizungswassers infolge von Temperaturänderungen und stabilisiert so den Systemdruck. Es besteht aus einem Druckbehälter mit Membran, die Heizungswasser und Gaspolster (meist Stickstoff oder Luft) trennt. Bei Erwärmung wird das Gas komprimiert; beim Abkühlen entlastet es den Wasserkreislauf. Steuerungsseitig sind eine Drucküberwachung, Meldungen bei Unter- oder Überdruck sowie die Einbindung von Sicherheitseinrichtungen (z. B. Sicherheitsventil, Nachspeisung) vorzusehen. Parametrierte Grenzwerte und Störmeldungen unterstützen die frühzeitige Erkennung von Abweichungen.



Abbildung 15: Bestehende Ausdehnungsgefässe

3.4.4.8 Jetfilter

Jetfilter sind Inline-Filter zur kontinuierlichen Fest-Flüssig-Trennung in Prozess- und Versorgungskreisläufen. Die kompakte Bauweise erlaubt eine flexible horizontale oder vertikale Installation. Filterelemente (häufig aus Edelstahl) sind auf lange Standzeiten und geringen Wartungsaufwand ausgelegt; die Rückspülung erfolgt in der Regel automatisch, zeit- oder differenzdruckgeführt, um einen störungsarmen Dauerbetrieb zu unterstützen. Für die SPS-Einbindung sind die Rückspülsteuerung, Betriebs- und Störmeldungen sowie Verriegelungen gegenüber nachgelagerten Komponenten relevant.



Abbildung 16: Neuer Jetfilter

3.4.4.9 Luftheizapparate

Luftheizapparate erwärmen Raum- oder Zuluft über ein wassergeführtes Heizregister; ein Ventilator fördert die Luft durch das Lamellenpaket. Die Heizleistung wird über die Wassermenge (z. B. Strangregulierungsventil) und die Ventilatorumdrehzahl moduliert. Typische Regelstrategien sind Zuluft- oder Raumtemperaturregelung. Aus Sicht der SPS sind Betriebsfreigabe, Drehzahlvorgabe, Rückmeldungen (Betrieb, Störung), der Stellbefehl des Strangregulierungsventils sowie Temperaturmessungen an Vorlauf, Rücklauf und in der Zuluft relevant. Eine abgestimmte Anlauf- und Nachlauf-Logik sowie die Koordination mit Pumpen sichern einen effizienten, störungsarmen Betrieb.

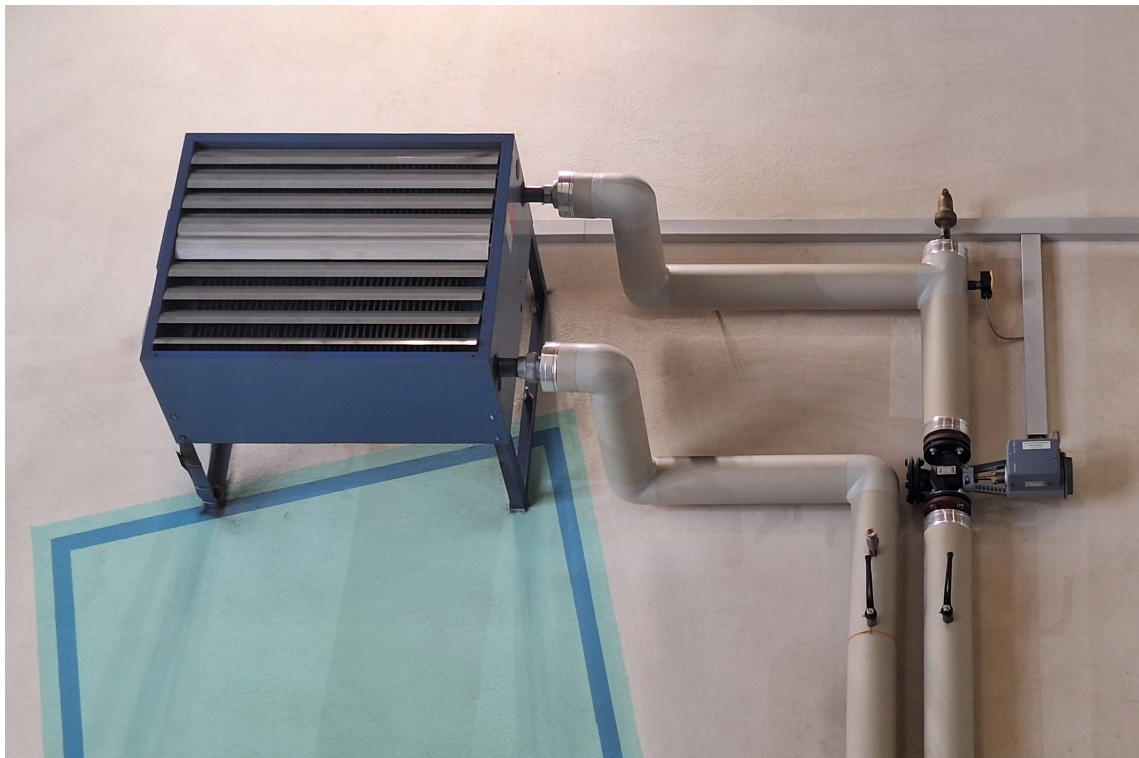


Abbildung 17: Luftheizapparat mit Strangregulierungsventil

3.4.5 Offertengrundlage und Budget

Die Offertengrundlage bildet die vertragliche Basis für die Projektdurchführung. Sie legt den finanziellen Rahmen sowie den Umfang der zu erbringenden Leistungen verbindlich fest und schafft Transparenz für Aufwand, Kosten und zeitliche Ressourcen. Zugleich dient sie als Referenz für die Überwachung und Steuerung des Projektfortschritts.

3.4.5.1 Offertengrundlage

Die Offertengrundlage, mit Schwerpunkt auf der SPS-Programmierung, sind wie folgt definiert:

Kommerzielles

- Das Angebot wird nach Aufwand abgerechnet mit Kostendach vom offerierten Preis
- Mehr- oder Minderleistungen sind möglich, müssen aber beim Kunden vorgängig angezeigt und freigegeben werden. Nachträgliche Forderungen werden nicht freigegeben
- Der Kunde nimmt zur Kenntnis, dass bei der Hardwarebeschaffung im Rahmen vom Engineering Abweichungen möglich sind

Schnittstellen

- Folgend die jeweiligen Verantwortlichen der beiden Parteien aufgeführt, um ein einheitliches Verständnis sicherzustellen

Softwareengineering

- Schlüsselfertiges Engineering inkl. aller Unterlagen für die Ausführung
- Anpassung vom Bestandsschema Nebenanlagen infolge Signalanpassungen
- Übergabe von CKW an KWG ist die Schemaübergabe inkl. Steuerungsmaterial für die Realisierung durch KWG Inbetriebsetzung
- Übergabe von KWG an CKW ist die Fertig montierte und verdrahtete Steuerungseinheit inkl. aller angeschlossenen externen Anbindungen Funktionskontrolle
- Datenpunkttest auf Leitsystem KWG

Lieferobjekte

- Terminplan Teilprojekte Steuerungersatz
- Datenpunktliste
- Steuerungseinheit inkl. Kleinmaterial zur Steuerung
- Originale SetFiles mit der Parametrierung
- Betriebsanleitung zur Steuerung Wärmepumpe

Termine

- Die Ausführung ist grundsätzlich im Juli / August 2025 vorgesehen und kann Seitens CKW sichergestellt werden.

Abgrenzungen

- Konzeptionell wird die bestehende Steuerung soweit möglich in die neue Steuerung übernommen.
- Mögliche Optimierungen können im Projektverlauf besprochen und auf Wunsch seitens KWG integriert werden
- Nachoptimierungen nach Abschluss der Inbetriebnahme werden separat verrechnet

3.4.5.2 Budget

Gemäss Offerte gliedern sich die vorgesehenen Arbeitsstunden wie folgt: 40 Stunden für die Projektkoordination, 200 Stunden für das Hardware- und Softwareengineering sowie 50 Stunden für die Inbetriebsetzung; dies ergibt eine maximale Gesamtarbeitszeit von 290 Stunden. Die Verrechnung erfolgt zu einem Stundensatz von 165 CHF für einen Leittechniker (ohne Abzüge und Mehrwertsteuer). Unter Berücksichtigung der vereinbarten Abzüge sowie der Mehrwertsteuer resultiert ein Gesamtbetrag von **46'845.15 CHF**.

Die Materialbeschaffung ist nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit; zur Einordnung: Die Kosten der Steuerungseinheit Siemens A8000 betragen inklusive Abzügen und Mehrwertsteuer **19'620.15 CHF**.

3.4.6 Fazit

Die Analyse der Ausgangslage ergibt ein konsistentes Bild der technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Programmierung der Wärmegruppe im Kraftwerk Göschenen. Im Zentrum steht eine robuste, modulare SPS-Lösung in CAExPlus, eingebettet in klar definierte Schnittstellen und Abläufe.

Die identifizierten Problemfelder (Ziele, Prioritäten, Ressourcen, Zeitplan, Kommunikation, Erfolgskriterien, Drittparteien) verdeutlichen, dass Projekterfolg sowohl sauberes Projektmanagement als auch eine tragfähige Technik benötigt. Die projektspezifischen Risiken der Erstumsetzung in realer Kundenumgebung, neuer Tools und Normen, der Einzigartigkeit der Anlage, eines dynamischen Umfangs sowie einer gestaffelten Inbetriebnahme wurden systematisch adressiert – unter anderem durch Meilensteinplanung mit Puffern und Abnahmekriterien, iterative Tests (Simulation, Modultests), frühe Schnittstellenklärung, gezielte Einarbeitung in CAExPlus sowie stringente Versionierung und Dokumentation. Dieses Vorgehen reduziert Verzögerungen und Fehlerwahrscheinlichkeit und erhöht zugleich Transparenz und Steuerbarkeit.

Die Bewertung von CAExPlus bestätigt die Eignung für eine normkonforme, grafisch modellierte und testbare Steuerungslogik mit wirksamen Diagnose- und Qualitätssicherungsfunktionen. Zusammen mit der strukturierten Betrachtung der Anlagentechnik entstehen konsistente Schnittstellen, Regelgrössen und Schutzfunktionen als solide Basis für Parametrierung und Verriegelungen.

Die Offertengrundlage und das Budget schaffen Klarheit zu Leistungsumfang, Verantwortlichkeiten, Lieferobjekten, Terminen und Kostendach und bilden damit den verbindlichen Entscheidungs- und Planungsrahmen.

3.5 Ideenfindung

Zu Projektbeginn wurden mehrere Ansätze für Aufbau, Makroeinsatz und Simulation der Steuerung geprüft. Auf Basis der Instruktionen von Stefan Bächler und gezeigter Beispielprojekte wurde die Zielrichtung rasch geklärt. Als Zielbild bot sich eine funktionsorientierte Strukturierung nach Anlageteilen an (z. B. Elektrodurchlauferhitzer, Heizgruppe Betriebsgebäude), da sie Verständnis, Wartung und Fehlersuche erleichtert und die Wiederverwendbarkeit fördert. Aufgrund der bestehenden Unternehmensstandards wird jedoch zunächst die etablierte EVA-Struktur (Eingang–Verarbeitung–Ausgang) umgesetzt; um das Potenzial des funktionalen Ansatzes dennoch zu veranschaulichen, erfolgt am Ende eine exemplarische Überführung auf diese Zielstruktur.

Parallel wurde der sinnvolle Einsatz von Makros festgelegt. Makros schaffen dort Mehrwert, wo sie komplexe oder häufig wiederkehrende Funktionen kapseln, Lesbarkeit erhöhen und Fehlerquellen reduzieren. In enger Abstimmung wurden die Einsatzstellen mit dem grössten Nutzen definiert; ausgewählte Makros werden so generisch gestaltet, dass eine Aufnahme in die CKW-Bibliothek möglich ist.

Für die Simulation standen ein qualitativer und ein quantitativer Ansatz zur Wahl. Angesichts des engen Zeitrahmens, fehlender exakter Komponentendaten und begrenzten verfahrenstechnischen Wissens wurde eine qualitative Simulation festgelegt. Sie bildet den Betrieb der Wärmepumpen und der übergeordneten Auswahlsteuerung ab, macht typische Fehlerbilder sichtbar und erlaubt Tests in relevanten Szenarien, ohne in unnötige Detailtiefe zu gehen.

Der Ideenprozess lieferte damit eine klare Umsetzungsstrategie und eine tragfähige Balance zwischen idealer Zielarchitektur und praktischer Machbarkeit: Die gültigen Standards werden zuverlässig eingehalten, gleichzeitig werden gezielte Verbesserungen methodisch vorbereitet.

3.6 Projektvertrag

Projekttitel:	SPS-Programmierung der Wärmegruppe von Kraftwerk Göschenen AG		
Projektauftraggeber:	CKW AG, Stefan Bächler, TEKÖ		
Projektleiter:	David Teixeira		
Projektdaten			
Start:	28.07.2025 13:00 Uhr	Ende:	23.09.2025 13:00 Uhr
Projektbeschreibung			
Ausgangslage / Projektbegründung:	Die bestehende Wärmepumpenanlage des Kraftwerks Göschenen wird umfassend modernisiert. Die derzeit installierte Wärmepumpe sowie die zugehörige Steuerungstechnik sind veraltet und entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Geplant ist der Ersatz durch zwei moderne, leistungsfähige Wärmepumpen, eine neue, zeitgemässe Steuerungseinheit sowie eine erweiterte Messtechnik, darunter Temperaturfühler, Drosselventile und weitere Komponenten zur Regelung und Überwachung des Betriebs. Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines zuverlässigen, übersichtlichen und normkonformen SPS-Programms vorgesehen, das die Wärmepumpenanlage effizient und betriebssicher steuert.		
Sinn und Zweck / Nutzen:	-Das Programmieren einer Siemens SPS erlernen mit «Toolbox CAExPlus». -Anwendung des theoretischen Wissens über Digitaltechnik und Schaltungstechnik in einem praxisnahen Projekt. -Energieverbrauch von KWG AG optimierten und zur nachhaltigen Ressourcennutzung beitragen.		
Projektrichtziel:	Entwicklung eines zuverlässigen, übersichtlichen und normkonformen SPS-Programms bis spätestens 1. September 2025.		

Endergebnisse	Erfolgskriterien
1. Es liegt eine vollständige Projektdokumentation im Format A4 vor. 2. Eine Analyse der Ausgangslage ist durchgeführt und beschrieben. 3. Die Projektstruktur- sowie Projektablaufplanung ist erstellt. 4. Eine T-Strassenkreuzung ist mit folgenden Ein vollständig getestetes, dokumentiertes und betriebsbereites SPS-Programm, das alle in der Betriebsanleitung beschriebenen Funktionalitäten implementiert. 5. Alle erforderlichen Eingänge, Ausgänge und Signale sind mit der OPM synchronisiert. 6. Sensoren und Aktoren liefern präzise Messwerte, die in der weiteren Verarbeitung verwendet werden. 7. Kritische Funktionen werden in einer geschlossenen Simulation vor der Inbetriebnahme getestet und dokumentiert. 8. Das SPS-Programm wird gemäss der Reihenfolge des Projekt-Inbetriebsetzungsplans entwickelt. 9. Es ist ein lessons learnt Bericht verfasst und in der Dokumentation berücksichtigt. 10. Die Projektarbeit ist anlässlich eines Vortrages dem Auftraggeber präsentiert.	1. Es können keine Abweichungen zum 4-Phasenmodell festgestellt werden und es müssen max. 10 Verständnisfragen geklärt werden. 2. Die Analyse liefert belegbare Daten und Erkenntnisse, die als Grundlage für weitere Entscheidungen und Massnahmen dienen. 3. Der Detaillierungsgrad sowie die logische Abfolge der Arbeitspakete wird durch den Kunden als sinnvoll und zweckmässig beurteilt. 4. Es liegt eine vollständig umgesetzte SPS-Programmierung vor, nach der Norm IEC 61131, die mehrheitlich in der Funktionsbausteinsprache realisiert wurde. 5. Die Wärmepumpensteuerung ist vollständig in das bestehende Leitsystem des Kraftwerks Göschen integrierbar. 6. Sämtliche im Projekt eingesetzten Sensoren und Aktoren liefern korrekte Werte, die in der Steuerung verarbeitet und über das Leitsystem ausgelesen werden können. 7. Die Simulation bildet die spätere Steuerungslogik soweit als sinnvoll ab und ermöglicht eine verkürzte Inbetriebnahme. 8. Die Inbetriebnahmebereitschaft und die erfolgreiche Durchführung der Simulation sind bis spätestens 1. September 2025 erreicht. 9. Der Bericht zeigen mind. 2 Erkenntnisse auf, die in zukünftigen Projekten besonderer Beachtung benötigen 10. Sämtliche Vorgaben zu den Inhalten der Präsentation wurden berücksichtigt.

Zielgenehmigung:	Die Ziele werden bewilligt. Datum: 04.08.2025 Unterschrift Auftraggeber: Stefan Bächler 
-------------------------	---

Projekttyp:

- ☐ Routineprojekt
☒ komplexes Standardprojekt
☐ Potenzial- / Innovationsprojekt
☐ Pionierprojekt

Begründung:

Es ist ein komplexes Standardprojekt, da es zwar auf etablierten Prozessen und Methoden basiert, jedoch durch zahlreiche Abhängigkeiten und Schnittstellen eine erhöhte Koordination erfordert. Die Ziele sind definiert, die Abläufe jedoch weniger vorhersehbar und verlangen eine umfassendere Planung. Es werden bewährte Technologien eingesetzt, deren Integration allerdings anspruchsvoller ist. Das Projekt wird regelmässig in ähnlicher Form durchgeführt, weist jedoch ein höheres Mass an Komplexität auf.

Projektorganisation:**Organisationstyp:****David Teixeira**

Fachspezialist Engineering bei CKW

Diagramm 1: Organigramm der Projektorganisation

Projektmitarbeiter:	Name / Vorname / OE <i>David Teixeira / HF TEKO</i>	Stellenprozent für Projekt 100%
Steering Committee: ☐ Ja ☒ Nein		
Sonstige Beteiligte:	Stefan Bächler, Fachexperte Leittechnik Kraftwerke bei CKW	

Projektplanung	
Projektphasen/ Meilensteine:	1. <i>Projektinitialisierung</i> ◆ <i>MS1: Projektvertrag unterschrieben</i> 2. <i>Projektplanung</i> ◆ <i>MS2: Projektablaufplanung abgeschlossen</i> 3. <i>Projektrealisierung</i> ◆ <i>MS3: Gruppe Wohnkolonie kompiliert</i> ◆ <i>MS4: Simulation erstellt</i> ◆ <i>MS5: Anwendung programmiert und geprüft</i> 4. <i>Projektabschluss</i> ◆ <i>MS6: Onlinepublikation publiziert</i> ◆ <i>MS7: Abgabe</i>
Projektentscheid:	☒ Das Projekt wird bewilligt. ☐ Das Projekt wird abgelehnt. Datum: Unterschrift Auftraggeber: Stefan Bächler 

3.6.1 Zielscheibe

Richtziel:

Entwicklung eines zuverlässigen, übersichtlichen und normkonformen SPS-Programms bis spätestens 1. September 2025.

1. Es liegt eine vollständige Projektdokumentation im Format A4 vor.
2. Eine Analyse der Ausgangslage ist durchgeführt und beschrieben.
3. Die Projektstruktur- sowie Projektablaufplanung ist erstellt.
4. Ein vollständig getestetes, dokumentiertes und betriebsberechtigtes SPS-Programm, das alle in der Betriebsanleitung beschriebenen Funktionalitäten implementiert.
5. Alle erforderlichen Eingänge, Ausgänge und Signale sind mit der OPM synchronisiert.
6. Sensoren und Aktoren liefern präzise Messwerte, die in der weiteren Verarbeitung verwendet werden.
7. Kritische Funktionen werden in einer geschlossenen Simulation vor der Inbetriebnahme getestet und dokumentiert.
8. Das SPS-Programm wird gemäss der Reihenfolge des Projekt-Inbetriebsetzungsplans entwickelt.
9. Es ist ein lessons learnt Bericht verfasst und in der Dokumentation berücksichtigt.
10. Die Projektarbeit ist anlässlich eines Vortrages dem Auftraggeber präsentiert.

- **CKW AG**
- **Stefan Bächler**
- **TEKO**

Endergebnisse

Sinn und Zweck

- Das Programmieren einer Siemens SPS erlernen mit «Toolbox CAExPlus».
- Anwendung des theoretischen Wissens über Digitaltechnik und Schaltungstechnik in einem praxisnahen Projekt.
- Energieverbrauch von KWG AG optimieren und zur nachhaltigen Ressourcennutzung beitragen.

Kunden

Erfolgskriterien

1. Es können keine Abweichungen zum 4-Phasenmodell festgestellt werden und es müssen max. 10 Verständnisfragen geklärt werden.
2. Die Analyse liefert belegbare Daten und Erkenntnisse, die als Grundlage für weitere Entscheidungen und Massnahmen dienen.
3. Der Detaillierungsgrad sowie die logische Abfolge der Arbeitspakete wird durch den Kunden als sinnvoll und zweckmässig beurteilt.
4. Es liegt eine vollständig umgesetzte SPS-Programmierung vor, nach der Norm IEC 61131, die mehrheitlich in der Funktionsbausteinsprache realisiert wurde.
5. Die Wärmepumpensteuerung ist vollständig in das bestehende Leitsystem des Kraftwerks Göschenen integrierbar.
6. Sämtliche im Projekt eingesetzten Sensoren und Aktoren liefern korrekte Werte, die in der Steuerung verarbeitet und über das Leitsystem ausgelesen werden können.
7. Die Simulation bildet die spätere Steuerungslogik soweit als sinnvoll ab und ermöglicht eine verkürzte Inbetriebnahme.
8. Die Inbetriebnahmebereitschaft und die erfolgreiche Durchführung der Simulation sind bis spätestens 1. September 2025 erreicht.
9. Der Bericht zeigen mind. 2 Erkenntnisse auf, die in zukünftigen Projekten besonderer Beachtung benötigen.
10. Sämtliche Vorgaben zu den Inhalten der Präsentation wurden berücksichtigt.

Diagramm 2: Zielscheibe

4 Projektplanung

Die Projektplanung bildet die Grundlage für eine strukturierte und steuerbare Umsetzung. Zentrale Instrumente sind der Projektstrukturplan, das Gantt-Diagramm zur Visualisierung von Abfolge, Abhängigkeiten und Puffern sowie der Netzplan zur Darstellung der logischen Reihenfolge und des kritischen Pfads. Durch den kombinierten Einsatz dieser Werkzeuge entsteht eine nachvollziehbare Projektstruktur, die eine zielgerichtete Ressourcenallokation, realistische Terminierung und wirksames Controlling ermöglicht. Risiken und Engpässe werden früh erkennbar, Korrekturmassnahmen lassen sich rechtzeitig einleiten; die zugrunde liegenden Annahmen und Planungsparameter werden im Kapitel erläutert.

4.1 Projektstrukturplanung

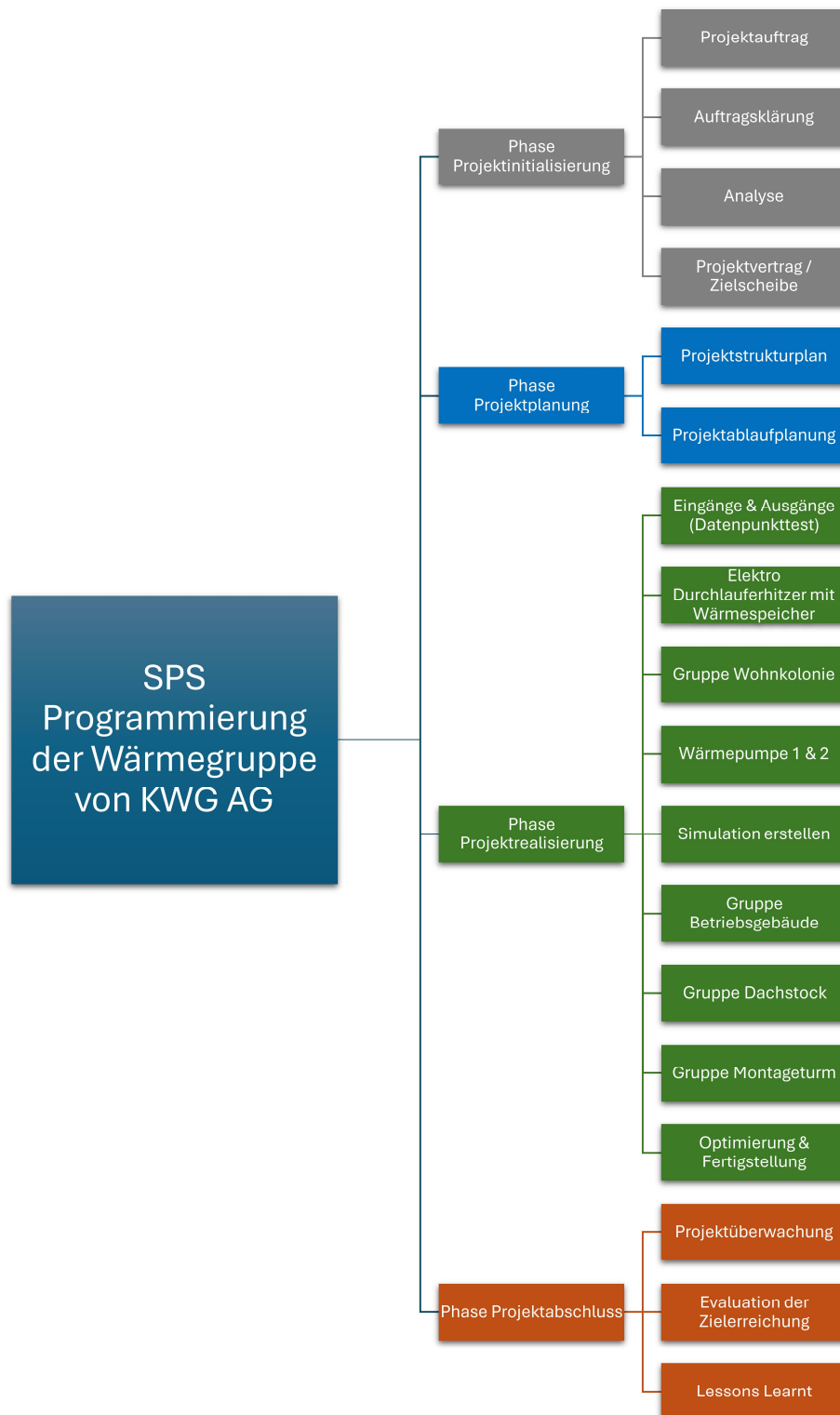


Diagramm 3: Projektstrukturplanung

4.2 Projektablaufplanung

4.2.1 Gantt-Diagramm

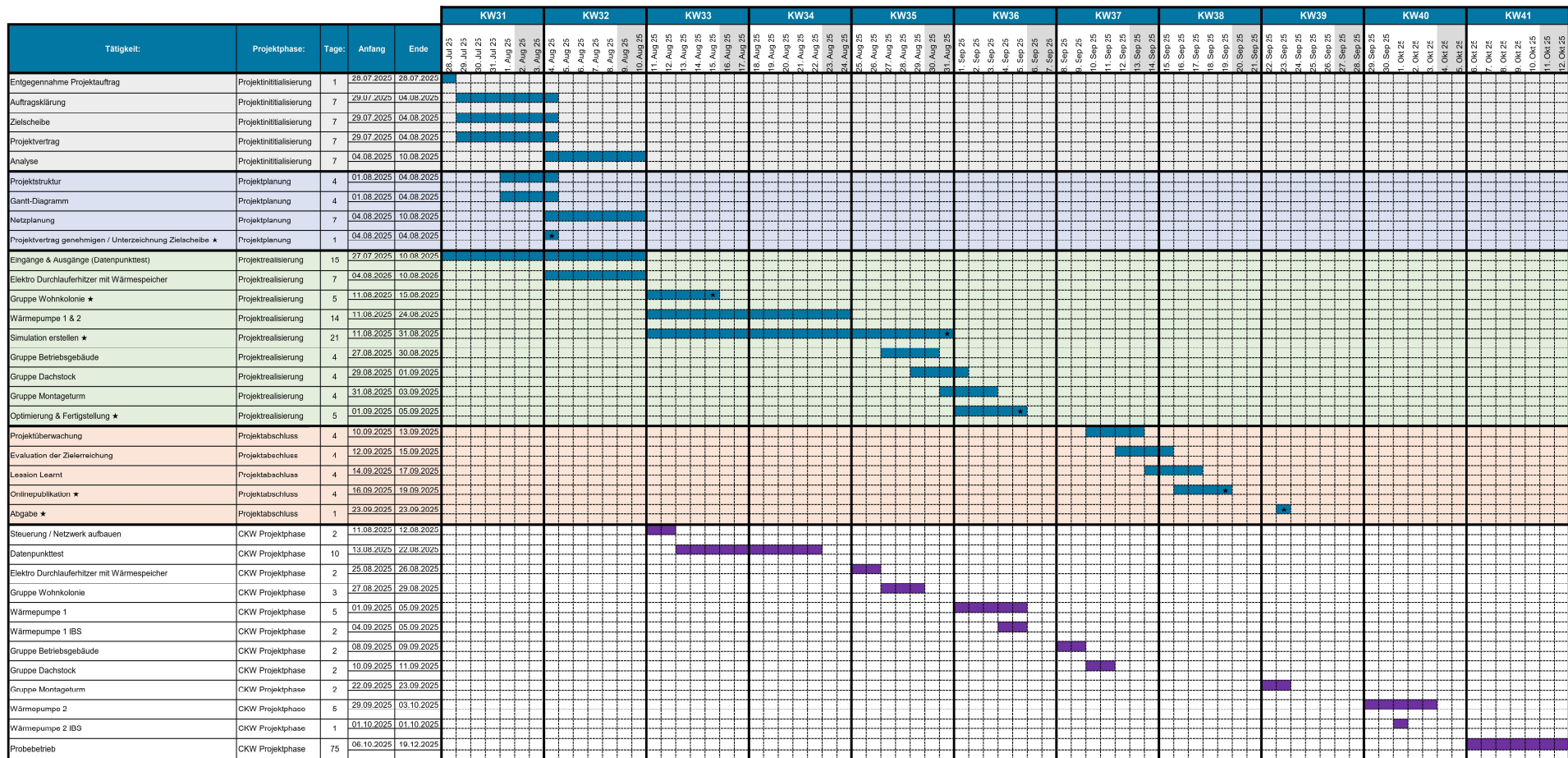


Diagramm 4: Gantt Diagramm

4.2.2 CKW Projektphase

3 Inbetriebsetzung	95 Tage	Mon 11.08.25	Fre 19.12.25	
3.1 Steuerung / Netzwerk aufbauen	2 Tage	Mon 11.08.25	Die 12.08.25	CKW-NESL
3.2 Datenpunkttest	8 Tage	Mit 13.08.25	Fre 22.08.25	CKW-NESL
3.3 Elektro Durchlauferhitzer mit Wärmespeicher	2 Tage	Mon 25.08.25	Die 26.08.25	CKW-NESL
3.4 Gruppe Wohnkolonie	3 Tage	Mit 27.08.25	Fre 29.08.25	CKW-NESL
3.5 Wärmepumpe 1	5 Tage	Mon 01.09.25	Fre 05.09.25	CKW-NESL;CKW Wärmetechnik
3.6 Wärmepumpe 1 IBS	2 Tage	Don 04.09.25	Fre 05.09.25	CKW-NESL;CKW Wärmetechnik;CTA
3.7 Gruppe Betriebsgebäude	2 Tage	Mon 08.09.25	Die 09.09.25	CKW-NESL
3.8 Gruppe Dachstock	2 Tage	Mit 10.09.25	Don 11.09.25	CKW-NESL
3.9 Gruppe Montageturm	2 Tage	Mon 22.09.25	Die 23.09.25	CKW-NESL
3.10 Wärmepumpe 2	5 Tage	Mon 29.09.25	Fre 03.10.25	CKW-NESL;CKW Wärmetechnik
3.11 Wärmepumpe 2 IBS	1 Tag	Mit 01.10.25	Mit 01.10.25	CKW-NESL;CKW Wärmetechnik;CTA
3.12 Probebetrieb	55 Tage	Mon 06.10.25	Fre 19.12.25	CKW-NESL

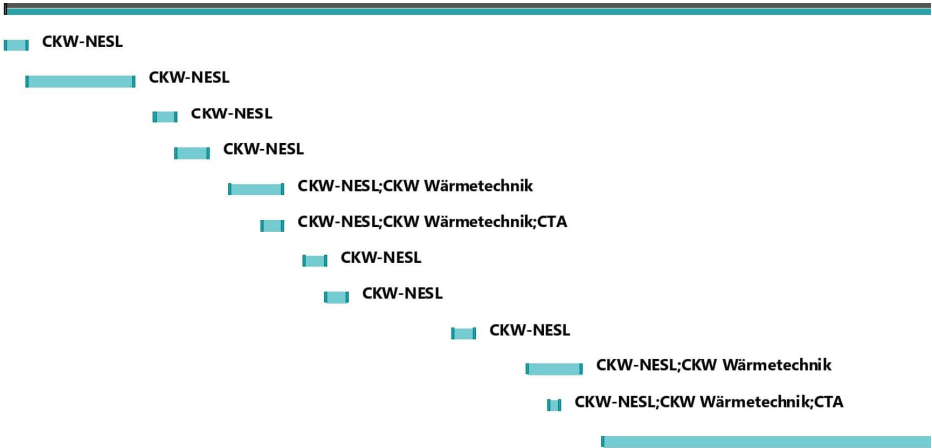


Diagramm 5: CKW Projektphase Diagramm

4.2.3 Netzplan

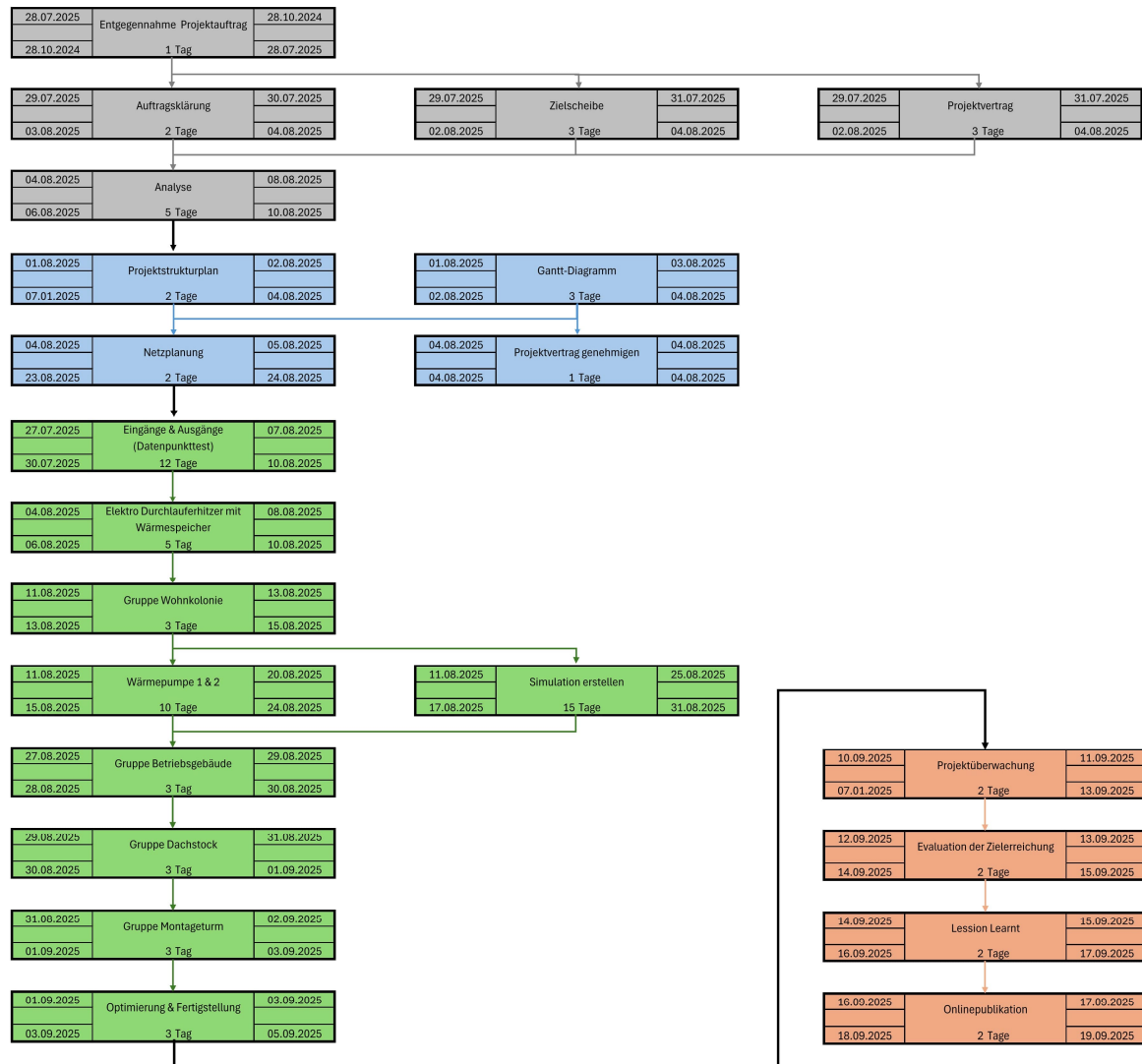


Diagramm 6: Netzplan der Arbeitspakete

5 Projektrealisierung

Die Projektrealisierung bildet den zentralen Bestandteil der praktischen Umsetzung der Steuerung für die Wärmegruppe. In diesem Kapitel werden zunächst die verwendeten Typinstanzen vorgestellt und mit den wichtigsten Informationen beschrieben. Anschliessend wird das Vorgehen bei den Offline-Tests sowie der Simulation erläutert, die der Überprüfung und Validierung der Steuerungsfunktionen dienen. Abschliessend erfolgt die Darstellung des Prozesses der Inbetriebnahme vor Ort, bei dem die Anlage unter realen Bedingungen getestet und in Betrieb genommen wird. Das Kapitel bietet damit einen umfassenden Überblick über alle wesentlichen Schritte und Massnahmen, die im Rahmen der Projektrealisierung durchgeführt wurden.

5.1 SPS-Steuerung nach CKW Richtlinie

Die SPS-Steuerung wurde gemäss den CKW-Richtlinien umgesetzt, wie sie im Dokument «Pfl_CAExPlus_Beschreibung_V08.pdf» beschrieben sind. Die Programmierung erfolgt durchgängig in der Funktionsbausteinsprache (FBS) nach IEC 61131-3. Der Steuerungsaufbau folgt konsequent dem EVA-Prinzip und wird an der Gesamtanlage einheitlich angewendet. Die drei Hauptkomponenten Eingabe (E), Verarbeitung (V) und Ausgabe (A) sind dabei in fünf Typinstanzen strukturiert:

- TI_I_AS: Eingänge, analoge Signale
- TI_I_BS: Eingänge, binäre Signale
- TI_V_ES: Einzelsteuerungen, typisch für Kraftwerksapplikationen
- TI_V_RG: Reglerfunktionen, typisch für Kraftwerksapplikationen
- TI_O_SV: Ausgänge, Signalverteilung (Hardware-Ausgänge, Schnittstellen usw.)

Die Erstellung der Steuerungssoftware basierte auf der Betriebsanleitung, welche die geforderten Betriebsabläufe und das Sollverhalten der Anlage beschreibt, sowie auf der Makroliste, die als Referenz für verfügbare und freigegebene Makros diente. Diese Referenz passte in etwa zu 90 % und war damit eine verlässliche Grundlage. Ergänzend wurden Makrobeschreibungen und zugehörige Dokumente herangezogen, um Funktion und Parametrierung eindeutig nachzuvollziehen.

Im Unterschied zu klassischen Ansätzen, bei denen Programme oder Typinstanzen primär auf Funktionsebene getrennt entwickelt werden, kommt hier ein durchgängig einheitliches EVA-Konzept zur Anwendung. Dadurch wird eine klare Trennung von Signalaufnahme, Verarbeitung und Ausgabe erreicht.

Aufgrund des engen Terminplans wurde die Implementierung entlang der geplanten Inbetriebnahmereihenfolge vorgenommen. Einzelne Teilanlagen wurden bereits während der Entwicklung in Betrieb genommen, sodass die Gesamtanlage zeitweise mit noch nicht vollständig fertiggestellter SPS-Software betrieben wurde. Dieses Vorgehen erforderte eine saubere Priorisierung der Funktionen, konsequentes Schnittstellenmanagement und eine iterative Erweiterung der Software, ohne die Betriebssicherheit zu gefährden.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die wichtigsten Funktionen der Software. Auf eine doppelte Darstellung wird verzichtet.

5.1.1 TI_I_BS

In der Typinstanz der binären Eingangssignale werden sowohl die Eingänge der SPS als auch die der Visualisierung abgebildet. Alle binären Signale und Telegramminformationen werden hier auf globale Variablen umgesetzt und, falls erforderlich, vorverarbeitet. Zu den möglichen Vorverarbeitungsschritten zählen:

- Verzögerungen
 - Invertierungen
 - Verknüpfungen
- Signalüberwachung
 - Impulsverlängerung
 - Wandlung von EM in DM

5.1.1.1 Einzelmeldungen von der SPS

Hier beginnt es zuerst mit den Einzelmeldungen, die entsprechend der Reihenfolge der jeweiligen Karten und I/O-Module angeordnet sind. Die Abstände zwischen den Signalen weisen auf reservierte Eingänge hin.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Signale auf der linken Seite dargestellt, in der Mitte befindet sich ein Force-Marker und auf der rechten Seite die zugehörige globale Variable. Der Force-Marker ermöglicht es, den Eingangswert bei Offline- oder Online-Verbindungen gezielt zu manipulieren, indem ein bestimmter Wert (TRUE oder FALSE) forciert wird. Dies ist besonders beim Testen oder bei der Fehlersuche äusserst hilfreich.

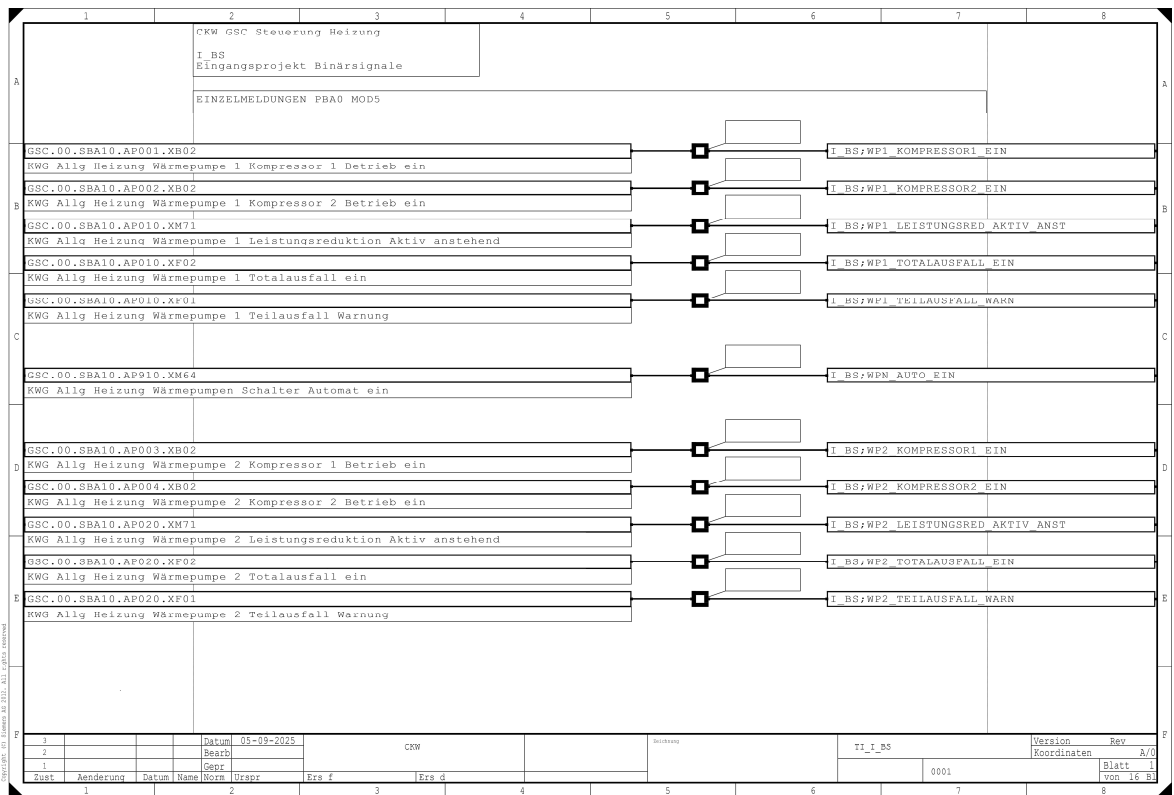


Abbildung 18: TI_I_BS, Seite 1, Binäre Eingänge A8000, Baugruppe PBA0, Karte MOD5

Falls ein Signal von der SPS vorverarbeitet werden muss, zum Beispiel bei einem Drehschalter mit einer Überbrückungszeit von 2 Sekunden beim Umschalten. So kann verhindert

werden, dass der Schalter während des Umschaltvorgangs kurzzeitig in die Position „AUS“ gelangt. Mithilfe von Variablen wird das gelöst und am Ende der Typinstanz vorverarbeitet. Ein Beispiel hierfür sind die Signale Wahlschalter «AUTO» und «FROST» sowie der Schalter «Tagesbetrieb Befehl anstehend», wie in den untenstehenden Abbildungen dargestellt.

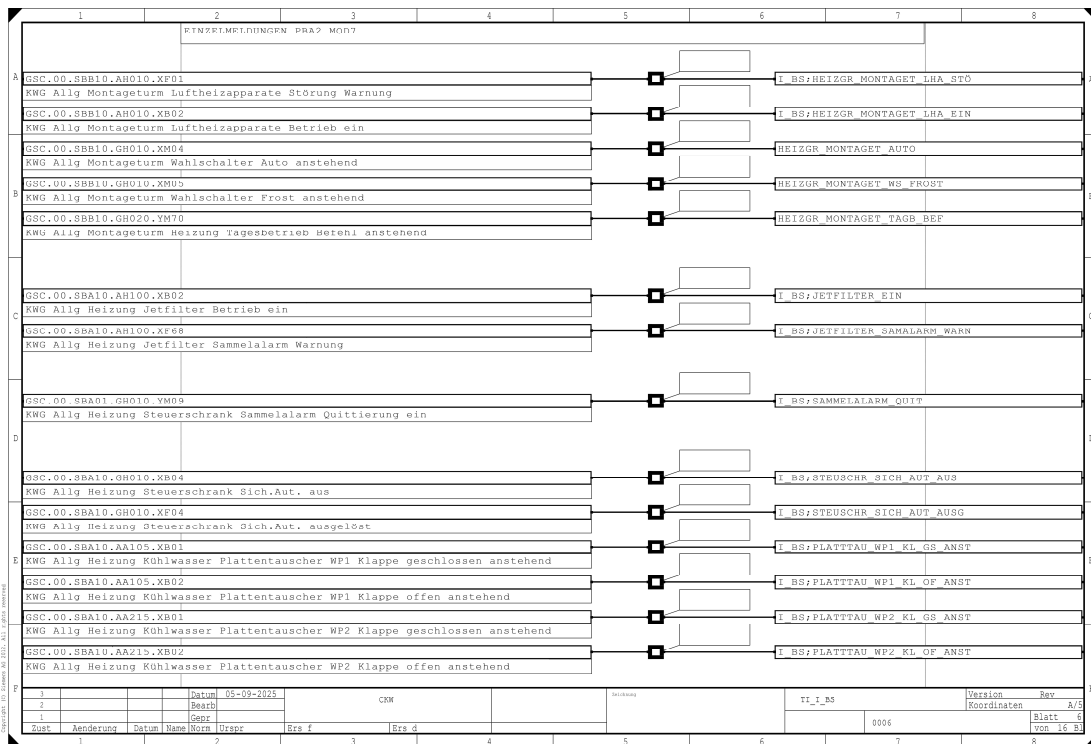


Abbildung 19: TI_I_BS, Seite 6, Interne Variablen, Vorverarbeitung auf Seite 15

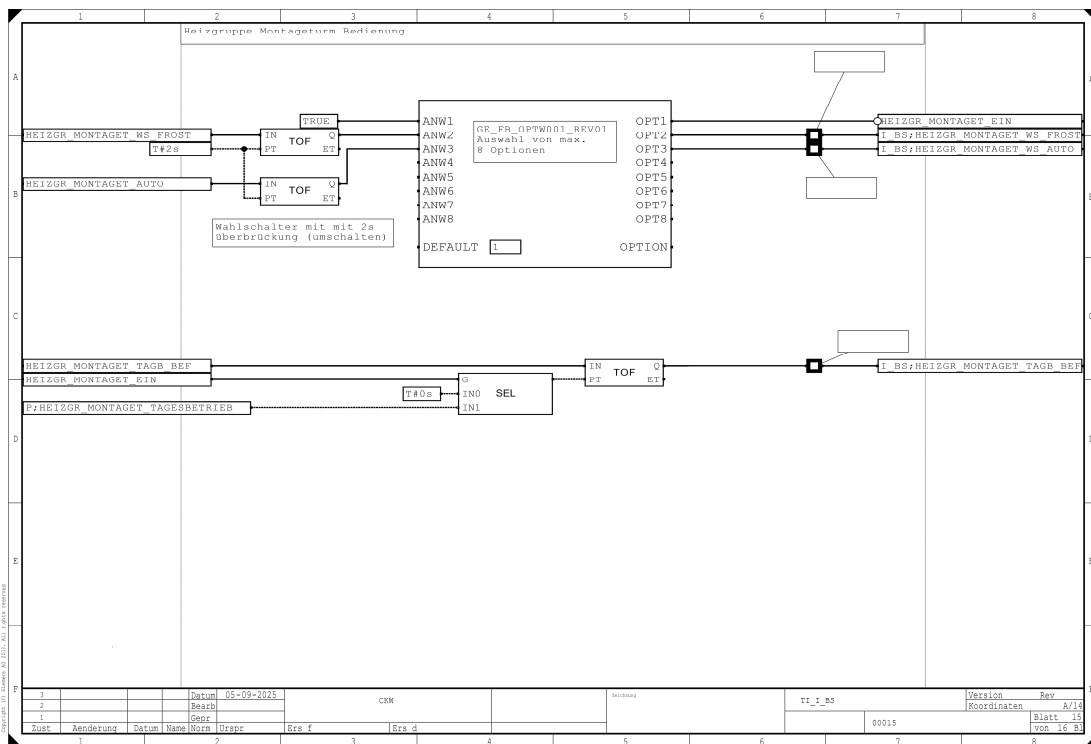


Abbildung 20: TI_I_BS, Seite 15, Vorverarbeitung interner Variablen zu globalen Variablen

5.1.1.2 Visualisierung

Binäre Signale und Telegramminformationen aus der Visualisierung werden im Anschluss behandelt. Dabei erfolgt die Abbildung nicht in einer festen Reihenfolge, sondern funktionsgleiche Signale werden gemeinsam dargestellt. Dadurch kann auf zusätzliche Seiten verzichtet werden, da alle relevanten Informationen und Funktionen direkt vorverarbeitet werden.

In der Abbildung ist der Einsatz von RS-Flipflops zu sehen, die die Betriebsarten „Aus“ und „Auto“ vorverarbeiten. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass es auch bei gleichzeitig anliegenden Signalen nicht zu unerwünschten Zuständen kommt. Störungen werden bereits an dieser Stelle abgefangen.

Ebenfalls zu sehen ist der Funktionsblock „GE_FB_OPTW001_REV01“. Dieser arbeitet ähnlich wie ein RS-Flipflop, kann jedoch bis zu acht Eingänge verarbeiten. Er stellt sicher, dass immer nur ein Signal aktiv ist. Falls mehrere Signale gleichzeitig anliegen, wird stets das Signal mit der höchsten Priorität ausgewählt. Dies ist besonders sinnvoll, wenn mehrere Betriebszustände wie „Auto“, „Hand“ und „Aus“ vorhanden sind.

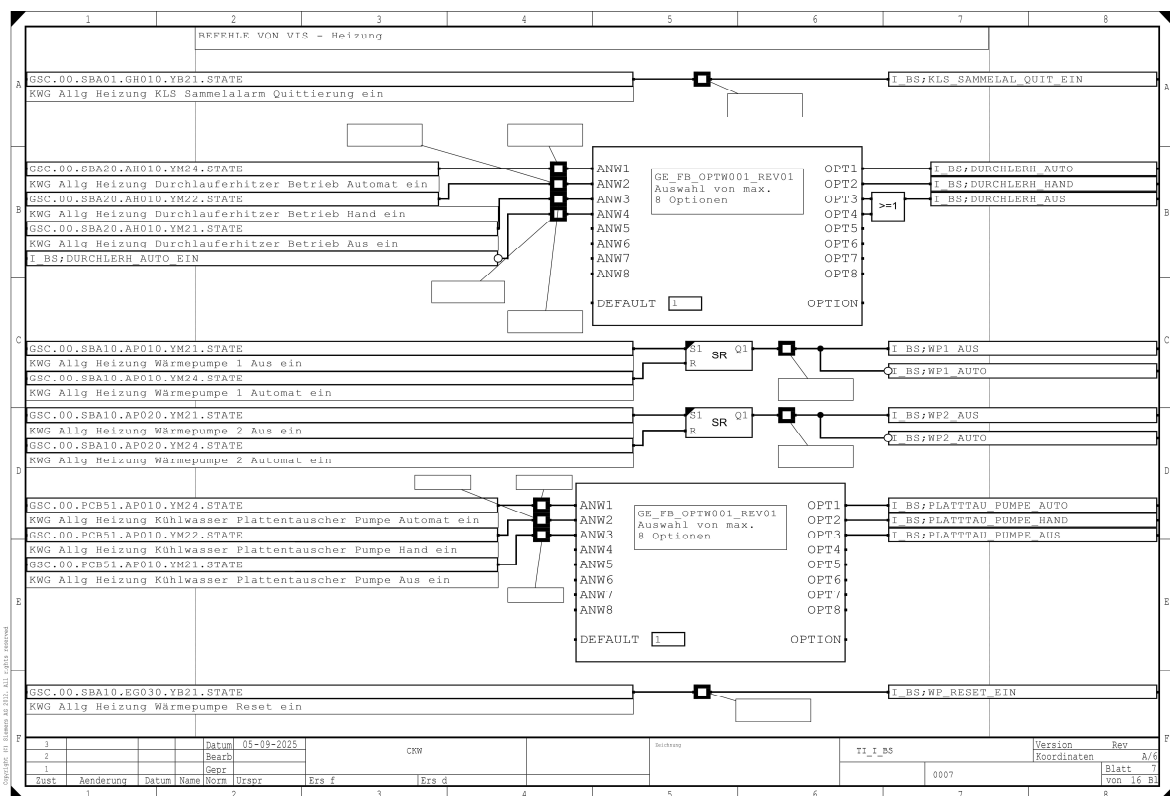


Abbildung 21: TI_I_BS, Seite 7, Binäre Befehle von der Visualisierung.

5.1.2 TI_I_AS

Wie bereits im vorherigen Kapitel „TI_I_BS“ beschrieben, werden in diesem Abschnitt die analogen Signale und Telegramminformationen abgebildet und auf globale Variablen umgesetzt. Zu den möglichen Vorverarbeitungsschritten zählen:

- Grenzwertbildung
- Einfrieren von Messwerten
- Mittelwertbildung
- Aufbereitung von Fremdsignale (Skalierung)
- Verknüpfungen (z. B. Drehzahl 1 und Drehzahl 2 zu einer Gesamtdrehzahl)

5.1.2.1 Messwerte von der SPS

Auch hier werden die Messwerte zunächst entsprechend der Reihenfolge der jeweiligen Karten und I/O-Module angeordnet.

Der Funktionsblock GE_FB_AST003_REV01 überwacht die Messwerterfassung der PT100-Thermostate. Für die Durchflussmessungen ist der Funktionsblock GE_FB_AST001_REV02 einzusetzen. Diese Funktionsblöcke überwachen den Messwert, speichern den zuletzt gültigen Wert und geben diesen aus, falls das Signal gestört ist oder einen ungültigen Wert liefert. Bei Bedarf kann zudem ein definierter Ersatzwert ausgegeben werden. Die Variable TIME_TOF gibt die Zeitspanne an, nach deren Ablauf bei einer Störung der letzte gültige Wert wieder an MW_OUT ausgegeben wird.

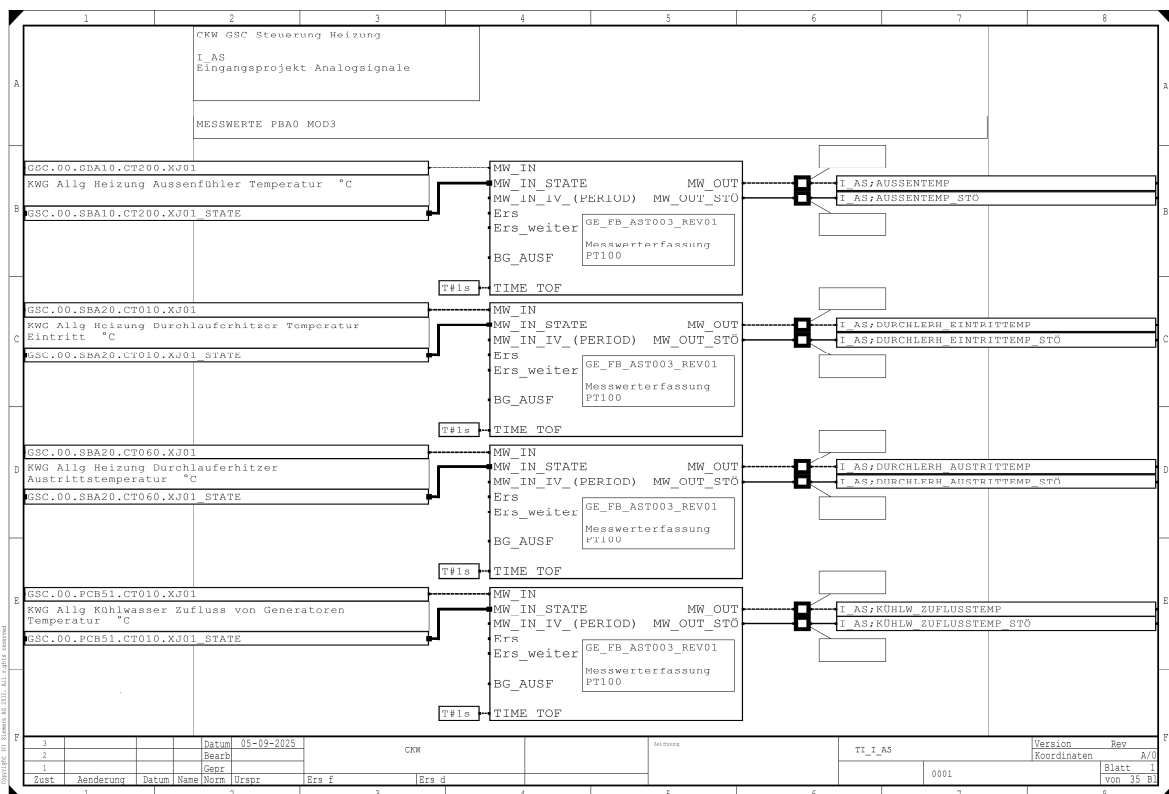


Abbildung 22: TI_I_AS, Seite 1, Analoge Werte A8000, Baugruppe PBA0, Karte MOD3

5.1.2.2 Visualisierung

Analoge Signale und Telegramminformationen aus der Visualisierung werden anschliessend behandelt. Die Abbildung erfolgt nicht in einer festen Reihenfolge. Stattdessen werden funktionsgleiche Signale gemeinsam dargestellt, wie bereits in der Typinstanz „TI I BS“ beschrieben.

Die Funktionsbausteine GE_FB_SW001_REV01 und GE_FB_SW002_REV01 übernehmen die Vorverarbeitung der analogen Werte. Bei gültigen Werten werden diese an den Ausgang SW_OUT weitergegeben. Wenn ungültige Werte auftreten oder ein Verbindungsabbruch vorliegt, wird der zuletzt gespeicherte Sollwert ausgegeben.

Der Unterschied zwischen den beiden Funktionsbausteinen besteht darin, dass SW002 ausfallsicher ist. Das bedeutet, bei einem Neustart, zum Beispiel nach einem Stromausfall, bleibt der letzte Wert erhalten. Beim SW001 ist dies nicht der Fall. Da die letzten Sollwertänderungen jeweils auf die Speicherkarte geschrieben werden, eignet sich der Funktionsbaustein SW002 nicht für Sollwerte, die häufig geändert werden.

Für die Funktionen „Elektrodurchlauferhitzer max. Heizstufen“ und „Umschaltung Wärmepumpe zum Elektrodurchlauferhitzer“ ist dies jedoch unkritisch. Beim „Kühlwasser Plattentaucher Pumpe“ ist eine Ausfallsicherung nicht erforderlich, da es sich um einen Handbefehl handelt und daher keine kritische Funktion vorliegt.

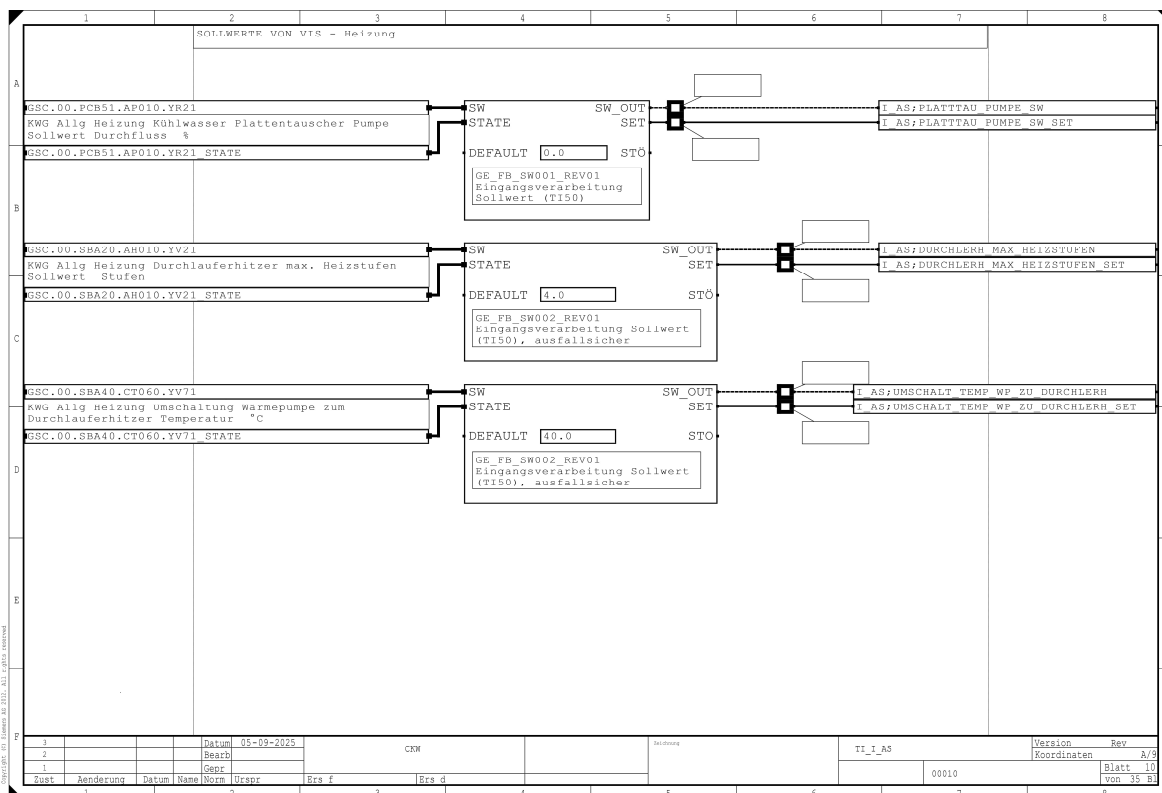


Abbildung 23: TI_I AS, Seite 10, Sollwerte aus der Visualisierung

5.1.2.3 Schaltuhr

Beim Betriebsgebäude, dem Dachstock sowie dem Montageturm wird zwischen Tag- und Nachtbetrieb unterschieden. Die Umschaltung erfolgt über die Steuerung; lediglich die Zeitpunkte, zu denen die Umschaltung stattfinden soll, werden über die Visualisierung eingegeben.

Der selbst entwickelte Baustein SCHALTUHR_V_SW verarbeitet diese Zeitangaben. Bei einer Änderung der Schaltzeit prüft der Baustein sowohl den Wert SW_STD als auch den Status STATE, um sicherzustellen, dass die Eingabe im gültigen Bereich von 00:00 bis 23:59 liegt. Ist der eingegebene Wert ungültig, bleibt der zuletzt gültige Wert weiterhin am Ausgang SW aktiv.

Nach einem Neustart der SPS wird über den Eingang SW_AKT auf den in der Visualisierung gespeicherten Wert zurückgegriffen, sodass ein gültiger Wert auch ohne erneute Eingabe übernommen wird.

Dieser Vorgang wird insgesamt 42 Mal ausgeführt, also 14 Mal pro Heizgruppe, jeweils für den Beginn und das Ende eines jeden Tages.

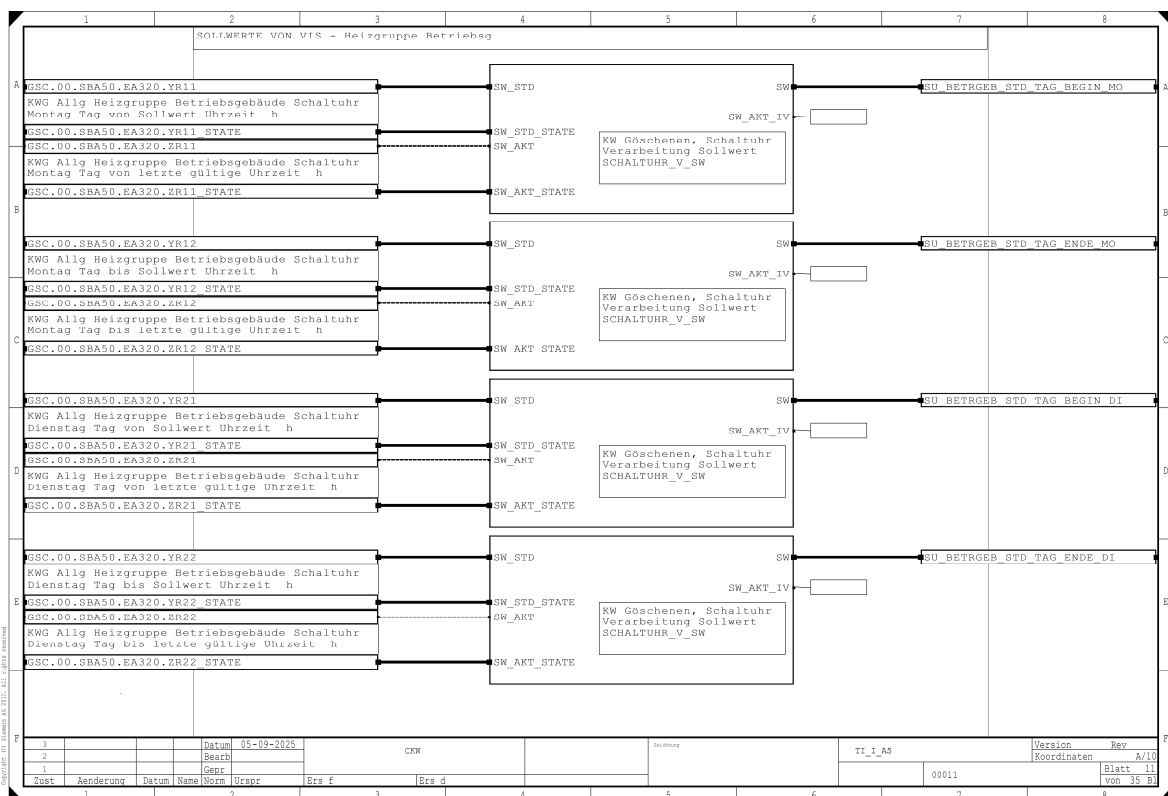
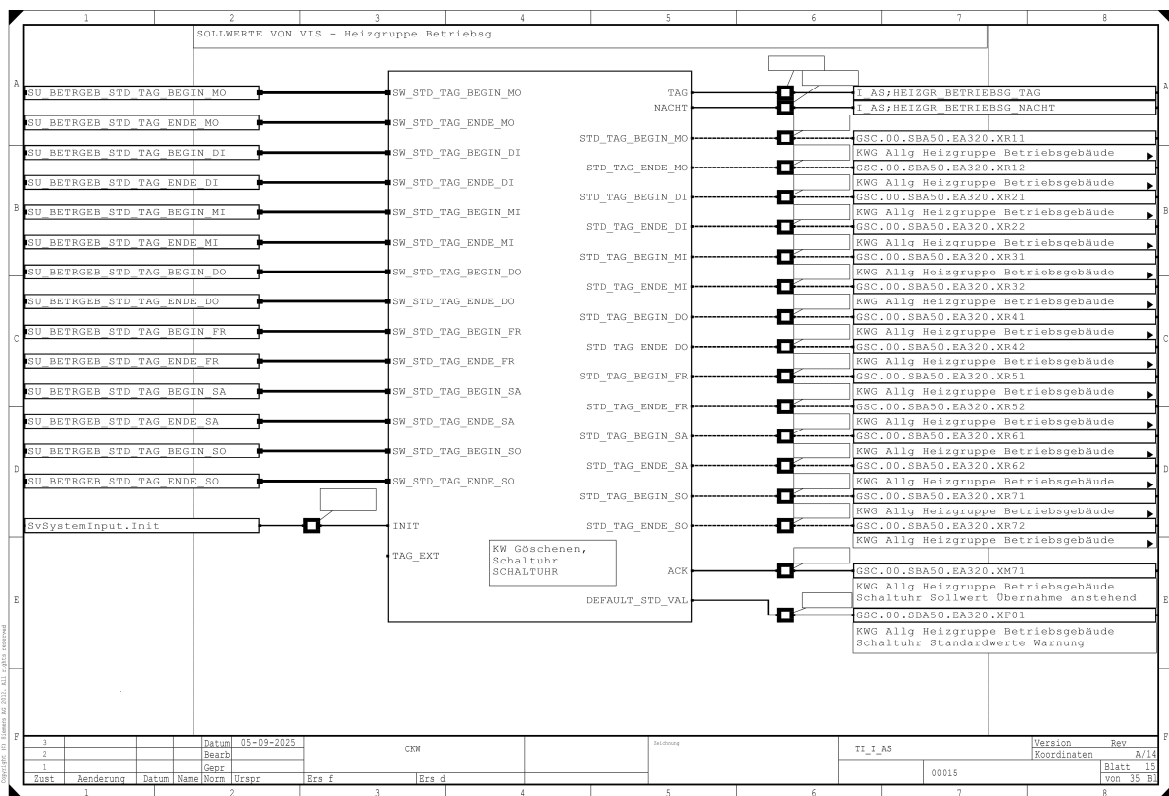


Abbildung 24: TI_I_AS, Seite 11, Vorverarbeitung der Sollwert-Uhrzeiten

Der Funktionsbaustein SCHALTUHR, welcher ebenfalls selbst entwickelt wurde, prüft die Werte von jedem SW_STD_TAG_BEGIN_XX und SW_STD_TAG_ENDE_XX. Befindet sich die aktuelle Zeit zwischen diesen beiden Werten, wird am Ausgang TAG der Wert „TRUE“ ausgegeben. Sind beide Werte auf 00:00 gesetzt, wird am Ausgang NACHT dauerhaft „TRUE“ ausgegeben.

Bei gültigen Uhrzeiten werden die Werte von STD_TAG_BEGIN_XX und STD_TAG_ENDE_XX an die Visualisierung übertragen. Ungültig sind die Werte dann, wenn die Beginn Zeit grösser als die Endzeit ist, zum Beispiel Beginn um 23:00 Uhr und Ende um 15:00 Uhr. In solchen Fällen wird die zuletzt gültige Kombination an die Visualisierung gesendet.

Bei jeder Änderung der Schaltzeiten wird zudem ein ACK-Signal übermittelt, das der Visualisierung die bevorstehende Übernahme anzeigt. Der Baustein verfügt ausserdem über Standardwerte: Der Tag beginnt standardmässig um 05:00 Uhr und endet um 22:00 Uhr.



5.1.2.4 Grenzwertbehandlung

Nach der Erfassung der Messwerte folgt die Grenzwertbehandlung. Bei der Grenzwertbehandlung werden gemessene Werte mit festgelegten Schwellenwerten verglichen, um bestimmte Zustände oder Aktionen auszulösen. So kann zum Beispiel bei Überschreiten oder Unterschreiten eines Grenzwertes ein Alarm ausgelöst oder eine Steuerungsfunktion aktiviert werden.

In der untenstehenden Abbildung ist dargestellt, wann die Kühlwassertanks voll sind. Falls die Tanks als „leer“ erkannt werden, wird automatisch neues Kühlwasser von den Turbinen angefordert, bis die Tanks wieder gefüllt sind.

Dieser Teil der Steuerungslogik konnte direkt aus einer anderen Steuerung übernommen werden, die zuvor in der Steuerung der „Nebenanlage“ eingesetzt war.

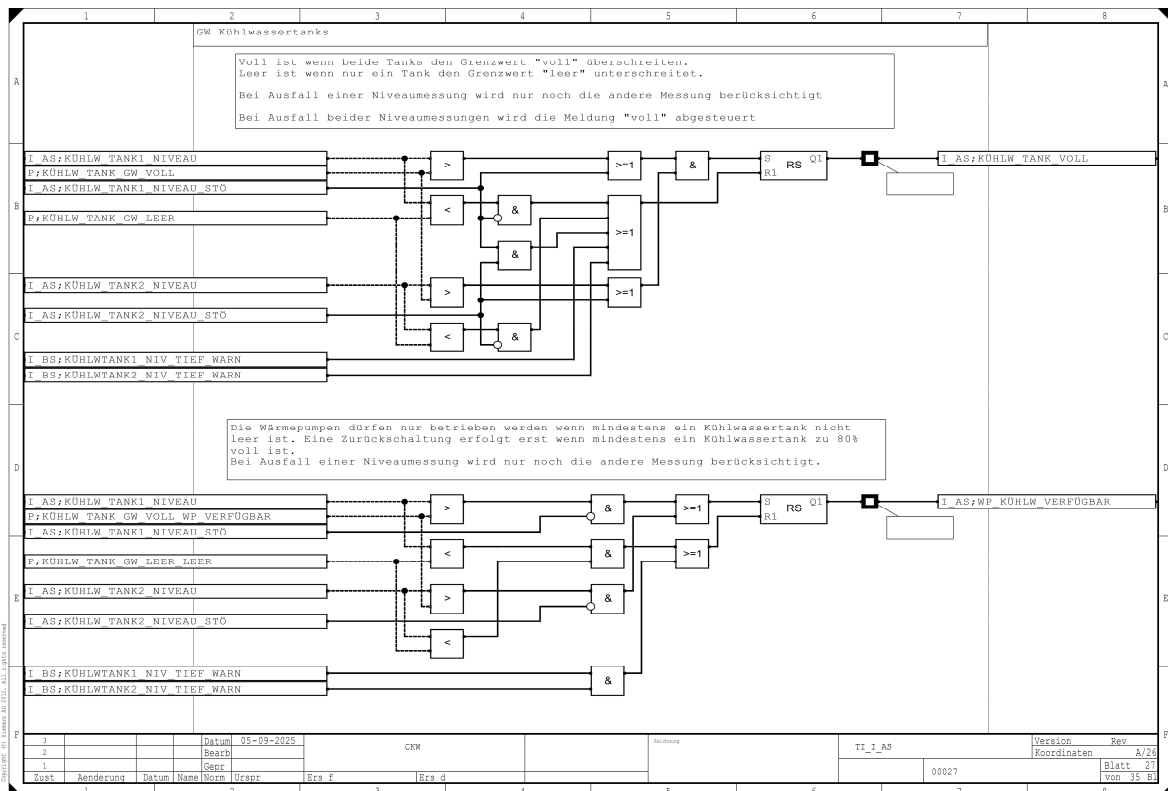


Abbildung 26: TI_I_AS, Seite 27, Grenzwerte, Kühlwassertank-Niveau

Zusätzlich wurde beim Durchfluss GW des Elektrodurchlauferhitzers ein SEL-Baustein verwendet. Dadurch ist sichergestellt, dass ein Durchflusssignal nur dann benötigt wird, wenn mindestens eine Heizstufe beim Elektrodurchlauferhitzer eingeschaltet ist.

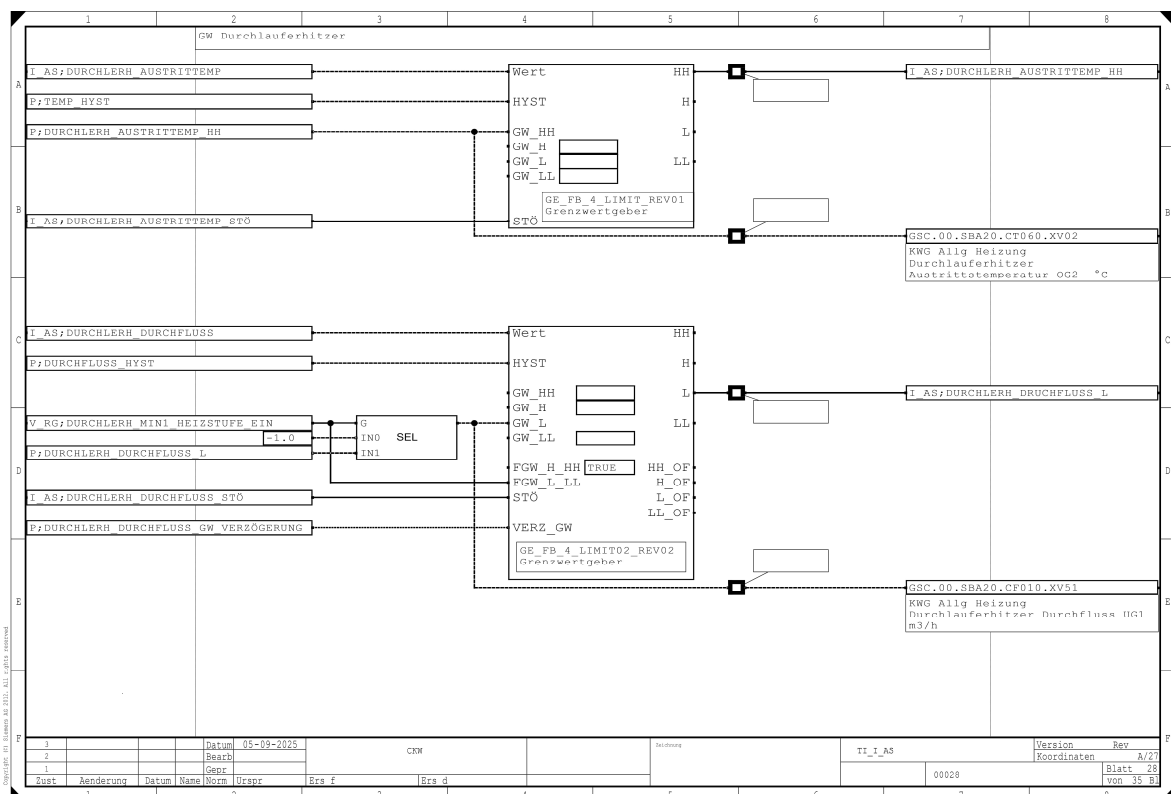


Abbildung 27: TI | AS, Seite 28, Grenzwerte, Temperatur und Durchfluss

5.1.3 TI_V_RG

In der Typinstanz für Regelungen (TI_V_RG) werden sämtliche Aufgaben im Zusammenhang mit Regelung, Auswahl, Anwahl, Begrenzung, Mischventilen, Betriebsstundenerfassung, PID-Reglern und Kennlinien behandelt. Im Unterschied zu anderen Typinstanzen existieren hier keine direkten Ein- oder Ausgänge; die Regelungsprozesse greifen direkt auf Globale Variablen und Globale Parameter zu. Die Reihenfolge der einzelnen Seiten innerhalb dieser Typinstanz ist nicht strikt vorgegeben, allerdings gilt als Grundsatz, thematisch zusammengehörige Funktionen zu gruppieren, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

5.1.3.1 Übergeordnete Regler

Ein zentrales Element der Wärmegruppe, das in diesem Abschnitt als Erstes behandelt wird, ist der übergeordnete Regler. Dieser bestimmt massgeblich die benötigte Heizleistung und steuert damit das Gesamtsystem. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht dieses übergeordneten Reglers.

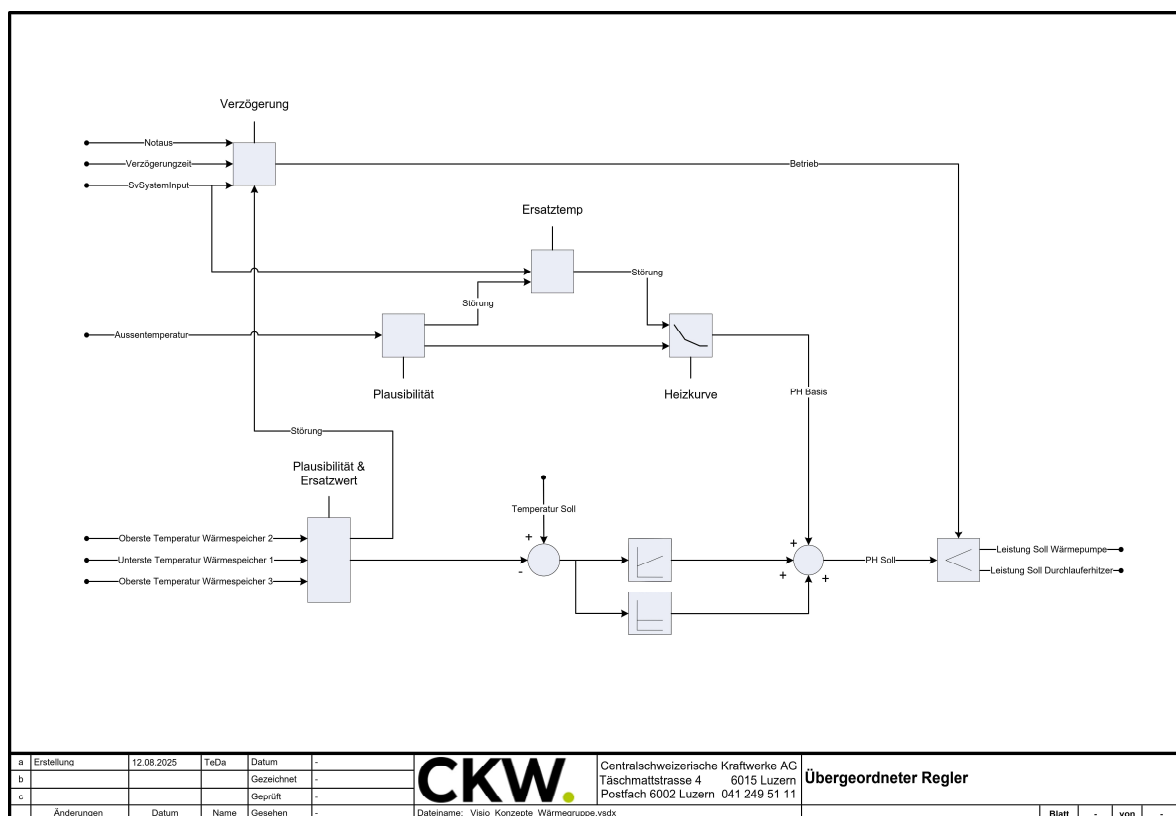


Diagramm 7: Übersicht übergeordneter Regler

Der dargestellte Regler verarbeitet unterschiedliche Eingangssignale, wie beispielsweise Temperaturwerte aus den Wärmespeichern und externe Signale wie Aussentemperatur oder Störungen. Über verschiedene Plausibilitätsprüfungen, Ersatzwertbildungen und eine Heizkurvenberechnung wird schliesslich die Soll-Leistung für die Wärmepumpe und den Elektrodurchlauferhitzer ermittelt. Dieses strukturierte Vorgehen gewährleistet eine

zuverlässige und effiziente Regelung der Anlage. Ausschnitte aus dem CAExPlus folgen dieser Seite.

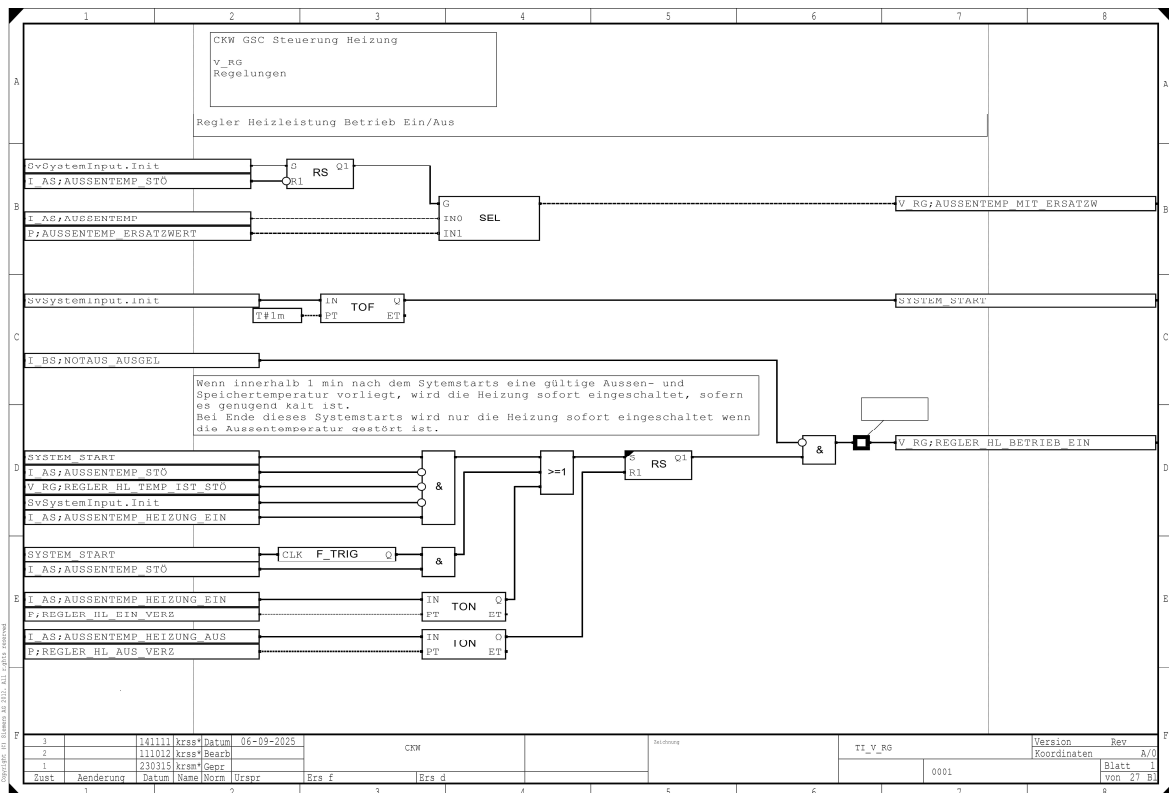


Abbildung 28: TI_V_RG, Seite 1, Ein- und Ausschaltbedingungen, übergeordneter Regler

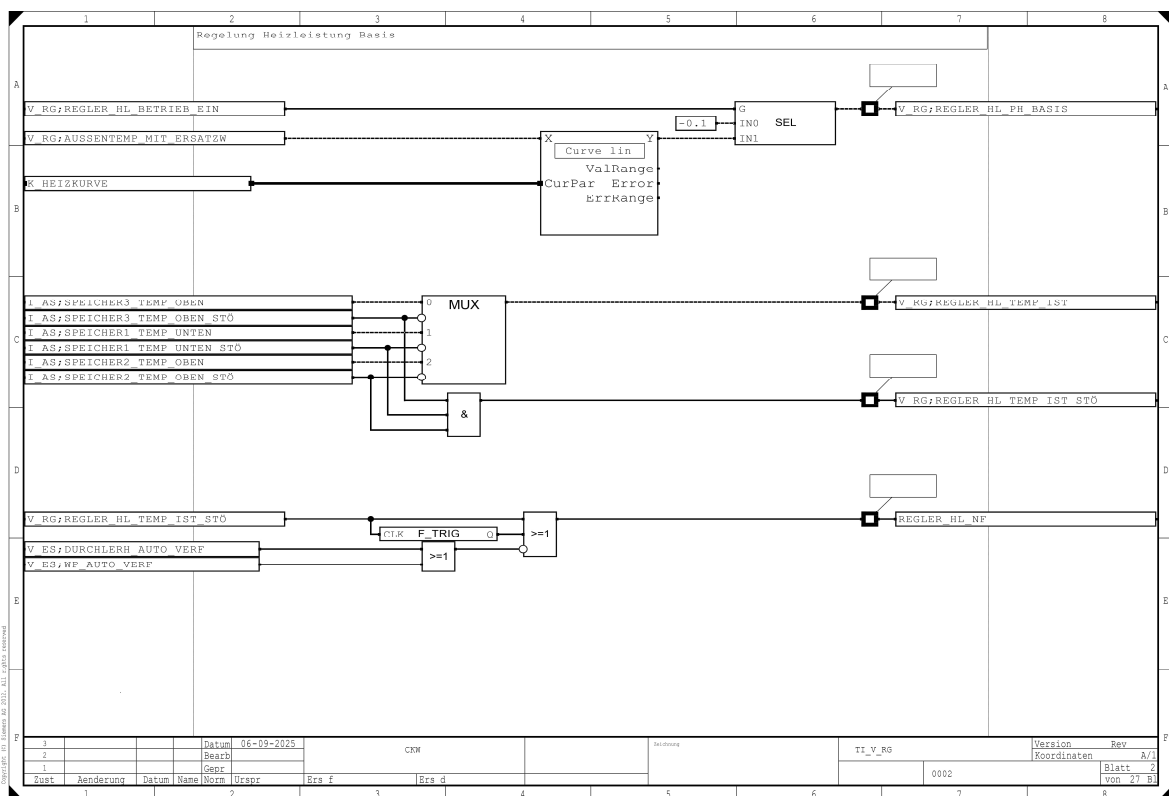


Abbildung 29: TI_V_RG, Seite 2, PH Basis des Übergeordneten Regler

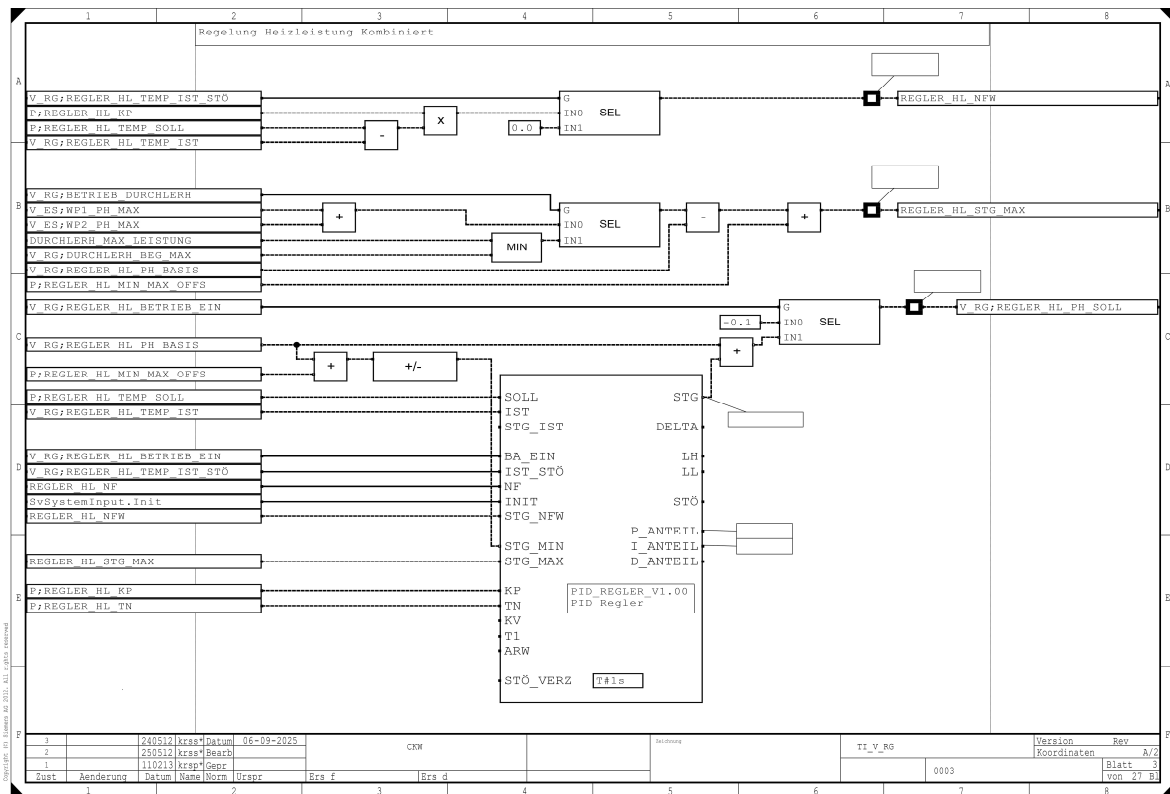


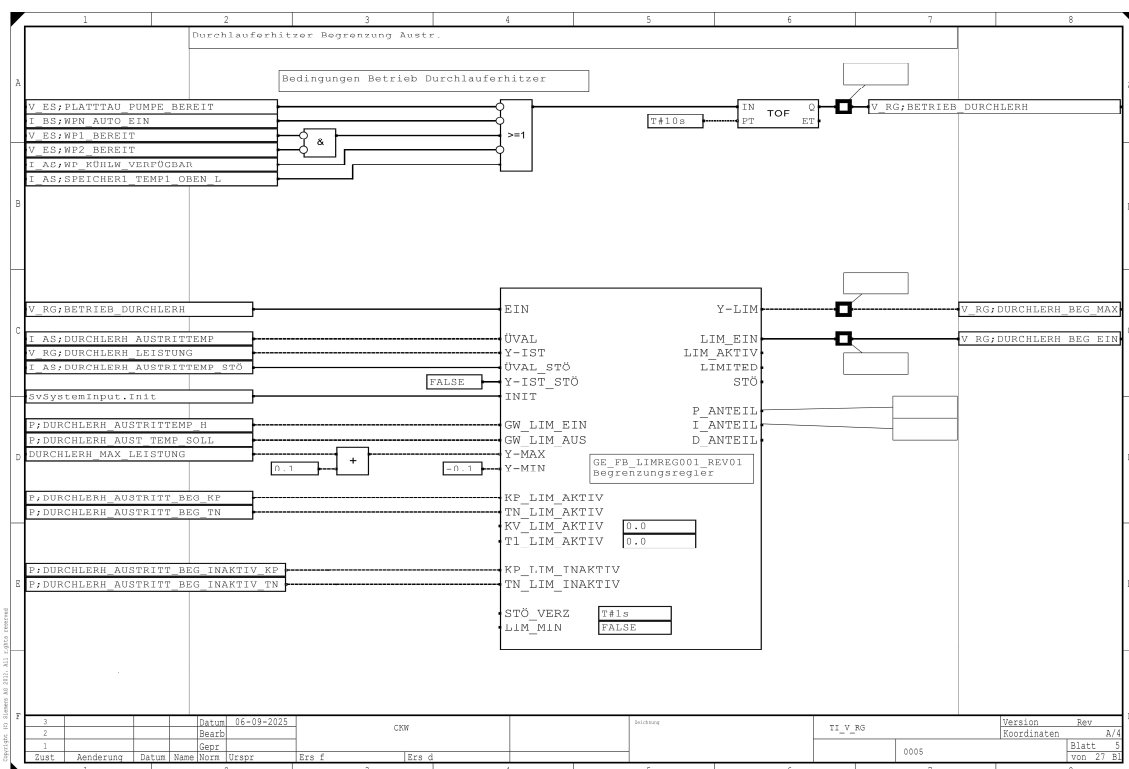
Abbildung 30: TI_V_RG, Seite 3, Übergeordneten Regler

Der PI-Regler ist ein zentrales Element der Steuerungs- und Regelungstechnik und kommt bei der Wärmegruppe zum Einsatz. Ein PI-Regler setzt sich aus einem proportionalen (P) und einem integralen (I) Anteil zusammen: Der proportionale Anteil reagiert direkt und linear auf Abweichungen zwischen Soll- und Istwert, während der integrale Anteil verbleibende, über die Zeit aufsummierte Fehler systematisch ausgleicht. Der differentielle Anteil (D) wird bei trägen reagierenden Systemen wie Heizungsanlagen meist nicht verwendet, da er störanfällig ist und selten zur Verbesserung beiträgt.

Hier wird ein Basiswert als Ausgangspunkt für die Regelung verwendet; der PI-Regler arbeitet dann die Differenz zwischen aktuellem Istwert und gewünschtem Sollwert auf diese Basis auf. Ist der Basiswert nicht exakt, gleicht der PI-Regler diese Abweichung aus, sodass systematische Fehler kompensiert werden, ohne dass kontinuierlich grosse Korrekturen nötig sind. Dies führt zu einer stabileren und effizienteren Regelung mit optimiertem Energieeinsatz. Ergänzend wird ein Nachführwert eingesetzt, der sicherstellt, dass der Regler auch bei wechselnden Betriebsbedingungen zuverlässig und robust arbeitet. So wird das gewünschte Regelverhalten der Wärmegruppe sichergestellt.

5.1.3.2 Begrenzungsregler

Beim Betrieb des Elektrodurchlauferhitzers wurde ein Begrenzungsregler implementiert, um die Ausgangstemperatur zuverlässig auf maximal 53°C zu begrenzen. Dieser Schutzmechanismus greift, wenn der PI-Regler im Zusammenspiel mit dem Mischventil zu träge oder zu schnell reagiert und die Temperatur den Grenzwert überschreitet. Überschreitet die Temperatur den eingestellten Grenzwert (GW_LIM_EIN), schaltet der Begrenzungsregler unabhängig von der PI-Regelung streng die Heizstäbe ab. Erst wenn die Temperatur wieder unter einen definierten Rückschaltwert (GW_LIM_AUS) sinkt, werden die Heizstäbe erneut freigegeben. Dadurch wird das Risiko einer Überhitzung zuverlässig minimiert und die Betriebssicherheit erhöht, selbst bei kurzfristigen Regelabweichungen oder Systemträgheit. Das Diagramm zeigt, wie der Begrenzungsregler den Ausgang (Y-LIM, rot) bei Überschreiten des Grenzwerts sofort reduziert und erst nach ausreichender Abkühlung wieder freigibt.



5.1.3.3 Betriebsstundenzählung und Auswahl Heizstab

Der Elektrodurchlauferhitzer verfügt über insgesamt acht Heizstäbe mit jeweils 50 kW Leistung. Um einen gleichmässigen Verschleiss zu gewährleisten und zu verhindern, dass immer die gleichen Heizstäbe übermässig beansprucht werden, wird für jeden Heizstab die individuelle Betriebsstundenzahl erfasst. Beim Zuschalten einer Heizstufe wird jeweils der Heizstab mit den geringsten Betriebsstunden ausgewählt; beim Abschalten erfolgt das Vorgehen entsprechend umgekehrt.

Dieses Prinzip wird analog auch bei den Wärmepumpen angewendet. Wichtig ist, dass der Wechsel nur beim Zu- oder Abschalten erfolgt: Läuft ein Heizstab oder eine Wärmepumpe bereits, wird während des Betriebs nicht umgeschaltet, selbst wenn sich die Betriebsstundenstände ändern. Während diese Massnahme bei den Heizstäben vor allem für eine gleichmässige Auslastung sorgt, ist sie bei den Wärmepumpen besonders entscheidend, um die Anzahl der Start-Stopp-Zyklen pro Gerät zu minimieren und dadurch die Lebensdauer zu verlängern sowie den Verschleiss zu reduzieren.

In der folgenden Abbildung sind die Funktionsbausteine BETRSTD_V1.00 dargestellt, welche die Betriebsstunden für die Heizstäbe 1 bis 4 erfassen und verwalten.

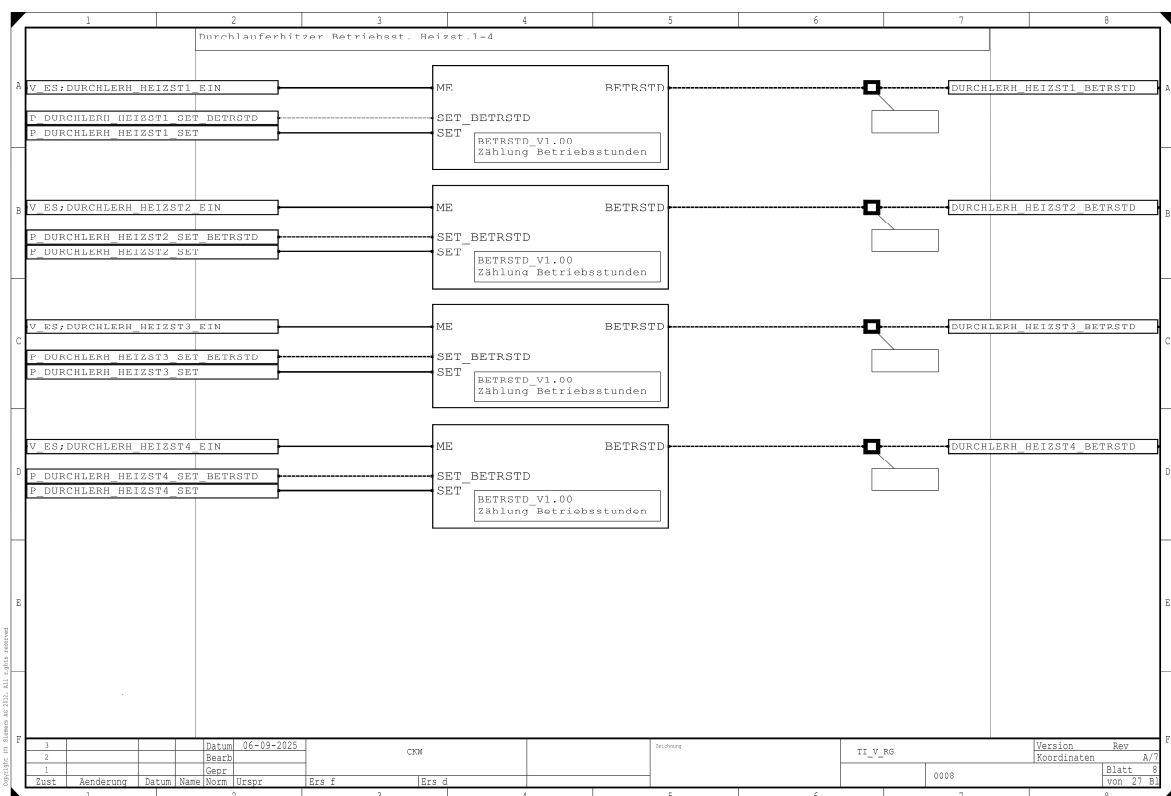


Abbildung 32: TI_V_RG, Seite 8, Betriebsstundenzähler der einzelnen Heizstäbe des Elektrodurchlauferhitzers

Beim Zuschalten einer neuen Heizstufe werden alle Heizstäbe, die einsatzbereit, aber noch nicht eingeschaltet sind, hinsichtlich ihrer Betriebsstunden verglichen. Mithilfe eines MIN-Bausteins wird automatisch der Heizstab mit den geringsten Betriebsstunden ausgewählt, sodass immer der am wenigsten beanspruchte Heizstab hinzugeschaltet wird.

Die Auswahl erfolgt über Selektoren (SEL), welche sicherstellen, dass nur bereite und noch nicht aktive Heizstäbe berücksichtigt werden. Heizstäbe, die entweder nicht bereit sind oder bereits eingeschaltet wurden, erhalten zur Unterscheidung eine künstlich hohe Betriebsstundenzahl und werden dadurch von der Auswahl ausgeschlossen. Nach der Auswahl und Freigabe werden die entsprechenden Ein- und Ausgangssignale über logische Verknüpfungen und Einschaltverzögerungen (TON) weiterverarbeitet, bevor die Heizstufe tatsächlich aktiviert wird.

Das Prinzip wird beim Abschalten analog angewendet: Hier kommt ein MAX-Baustein zum Einsatz, sodass jeweils der Heizstab mit den meisten Betriebsstunden als letzter abgeschaltet wird.

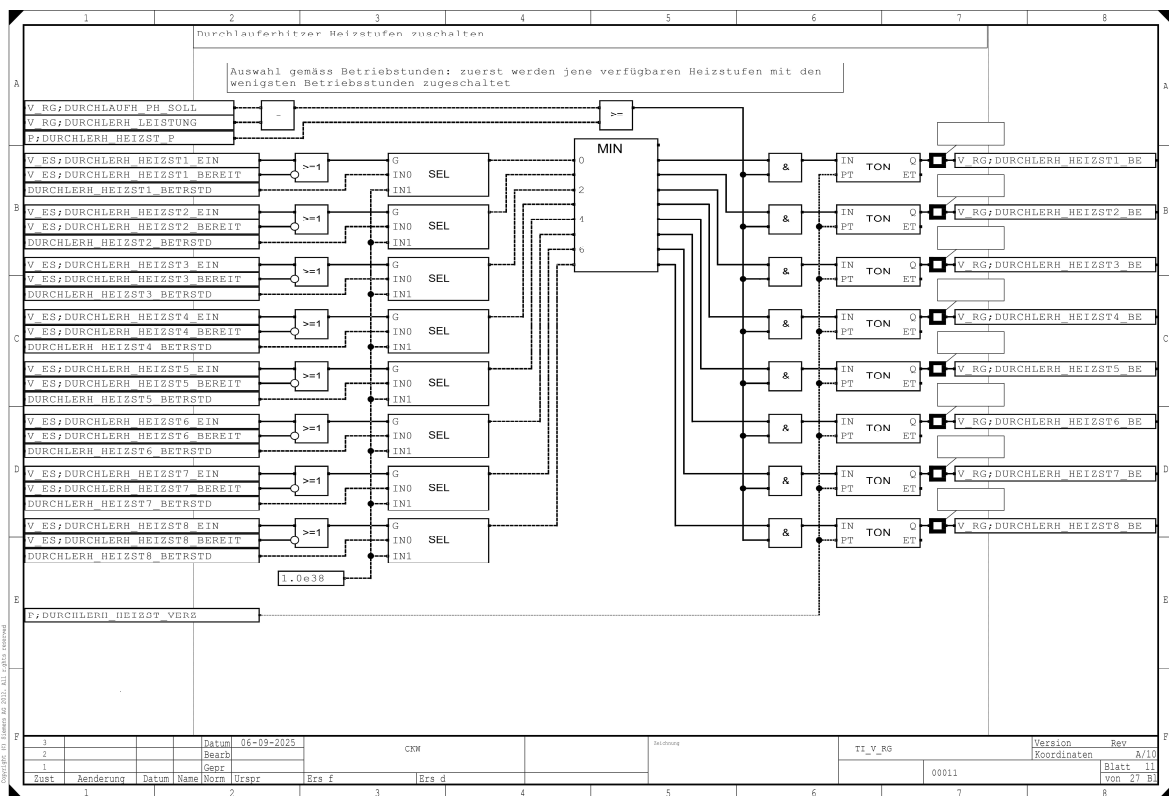


Abbildung 33: TI_V_RG, Seite 11, Heizstäben zuschaltung des Elektrodurchlauferhitzers

5.1.3.4 PI-Regler bei der Wärmepumpe

Jede Verdampfer- und Kondensatorpumpe der jeweiligen Wärmepumpe wird mit einem PI-Regler angesteuert. Der PI-Regler der Verdampferpumpe hält die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt konstant bei 3,5 °C. Bei der Kondensatorpumpe regelt der PI-Regler die Austrittstemperatur präzise auf 52 °C. Bei beiden Pumpen ist es wichtig, dass beim Stufenwechsel der Wärmepumpe der Reglerwert entsprechend nachgeführt wird. Welche Werte nachgeführt werden, hängt von der jeweiligen Betriebsstufe ab, in die umgeschaltet wird. In der folgenden Abbildung ist die Regelung der Verdampferpumpe der Wärmepumpe 1 dargestellt.

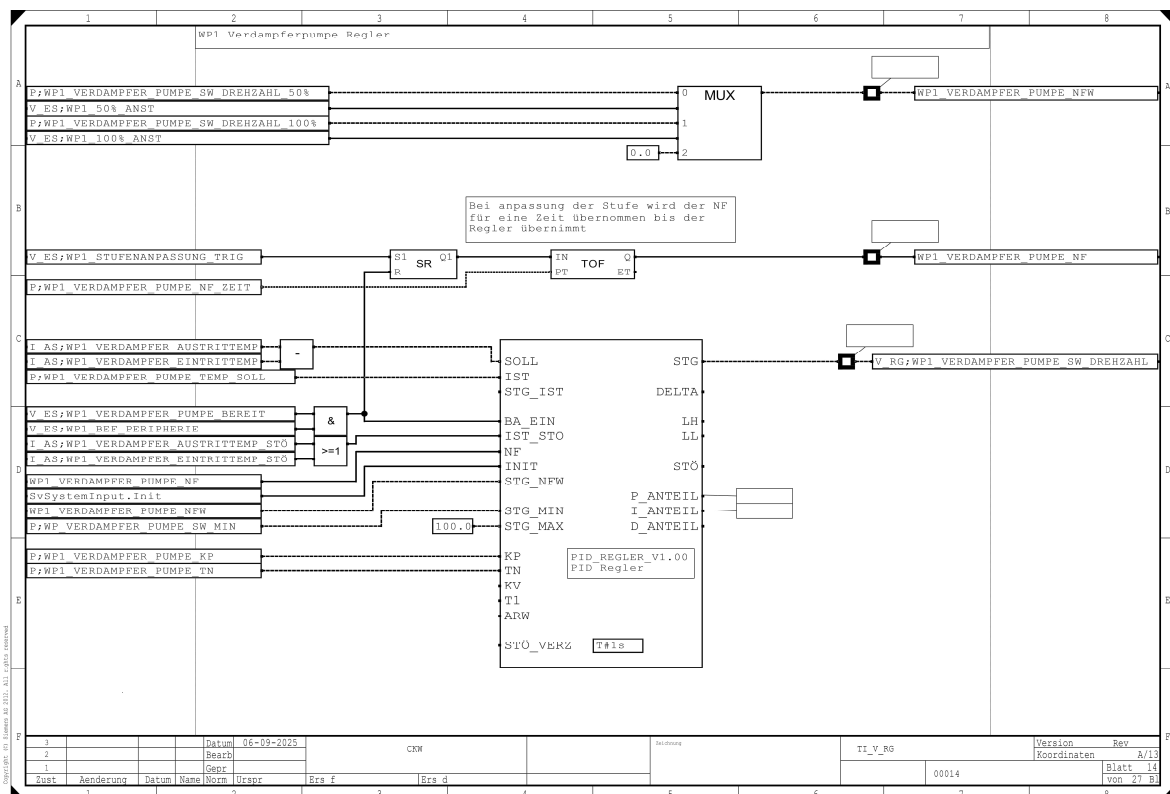


Abbildung 34: TI_V_RG, Seite 20, PI-Regler für die Verdampferpumpe der Wärmepumpe 1

5.1.3.5 Mischventile

In den Heizkreisen des Elektrodurchlauferhitzers, der Wärmepumpe sowie in den Heizgruppen des Betriebsgebäudes und des Dachstocks kommen Mischventile zum Einsatz, die ohne Positionsrückmeldung arbeiten. Diese Ventile werden über einen Dreipunkt-Stellkreisregler angesteuert, der die drei Befehle Öffnen, Schliessen und Stopp ausgibt. Der Regler entscheidet anhand der Abweichung zwischen Sollwert und Istwert, ob das Ventil weiter geöffnet, weiter geschlossen oder in seiner aktuellen Position belassen wird. Liegt der Istwert unter dem Sollwert, wird das Ventil geöffnet. Liegt er darüber, schliesst das Ventil. Ist der Sollwert erreicht, bleibt das Ventil stehen.

Da das Ventil keine Rückmeldung über seine genaue Position liefert, erfolgt die Steuerung zeitbasiert. Der verwendete Funktionsbaustein GE_FB_STKREG001_REV3 ermöglicht es, maximale und minimale Befehls- sowie Pausenzeiten zu parametrieren. Im quasistetigen Regelbereich, also bei kleinen Abweichungen zwischen Soll- und Istwert, werden die Befehle als kurze Impulse ausgegeben. Je näher der Istwert am Sollwert liegt, desto kürzer werden die Befehle und desto länger die Pausen. Bei grösseren Abweichungen arbeitet das System mit längeren Dauerbefehlen, um schnell zu reagieren.

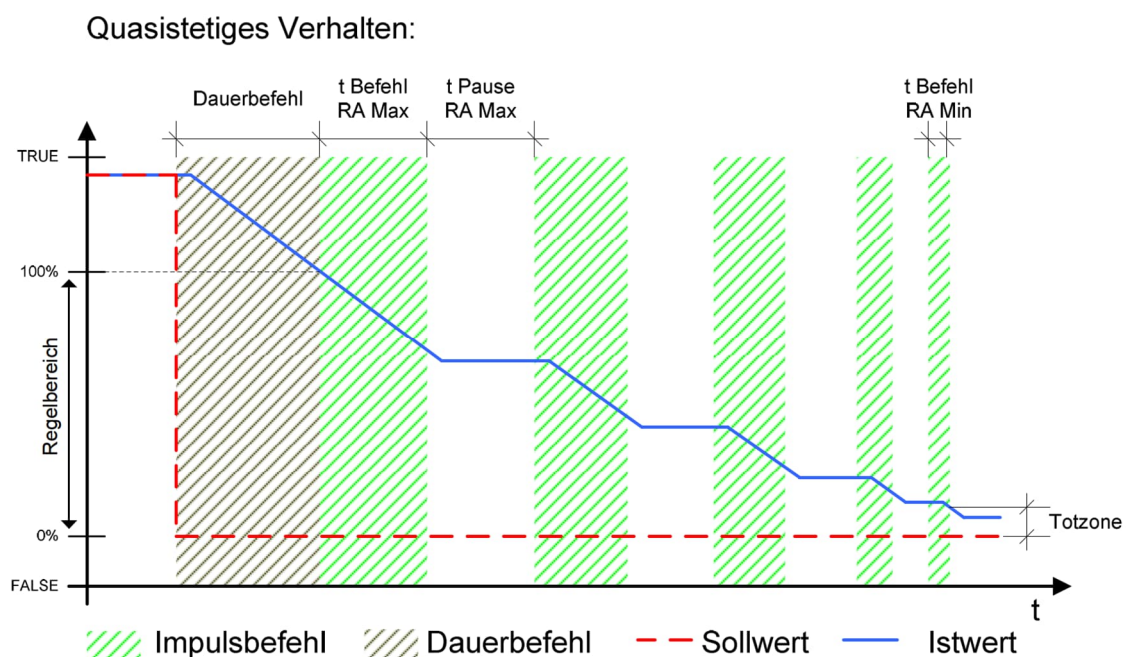


Diagramm 9: Quasi-stetiges Verhalten von Mischventilen

Das Diagramm zeigt das Prinzip dieses quasistetigen Verhaltens: Zunächst werden längere Dauerbefehle ausgegeben, um grosse Abweichungen rasch auszugleichen. Sobald sich der Istwert dem Sollwert nähert, verkürzt sich die Befehlszeit und es entstehen Impulsbefehle mit längeren Pausen, wodurch das Ventil feinfühlig nachgestellt wird. In der Totzone, das heisst bei sehr kleiner Abweichung, bleibt das Ventil stehen. Durch diese Regelstrategie lässt sich auch ohne Positionsrückmeldung eine stabile und effiziente Temperaturhaltung sicherstellen, sofern die Laufzeiten des Ventils und die Regelparameter sorgfältig eingestellt sind.

In der folgenden Abbildung ist der Funktionsbaustein GE_FB_STKREG001_REV3 dargestellt, mit denen das Mischventil der Heizgruppe Betriebsgebäude automatisch geregelt wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Ventil bei Bedarf auch manuell über einen Handbefehl anzusteuern.

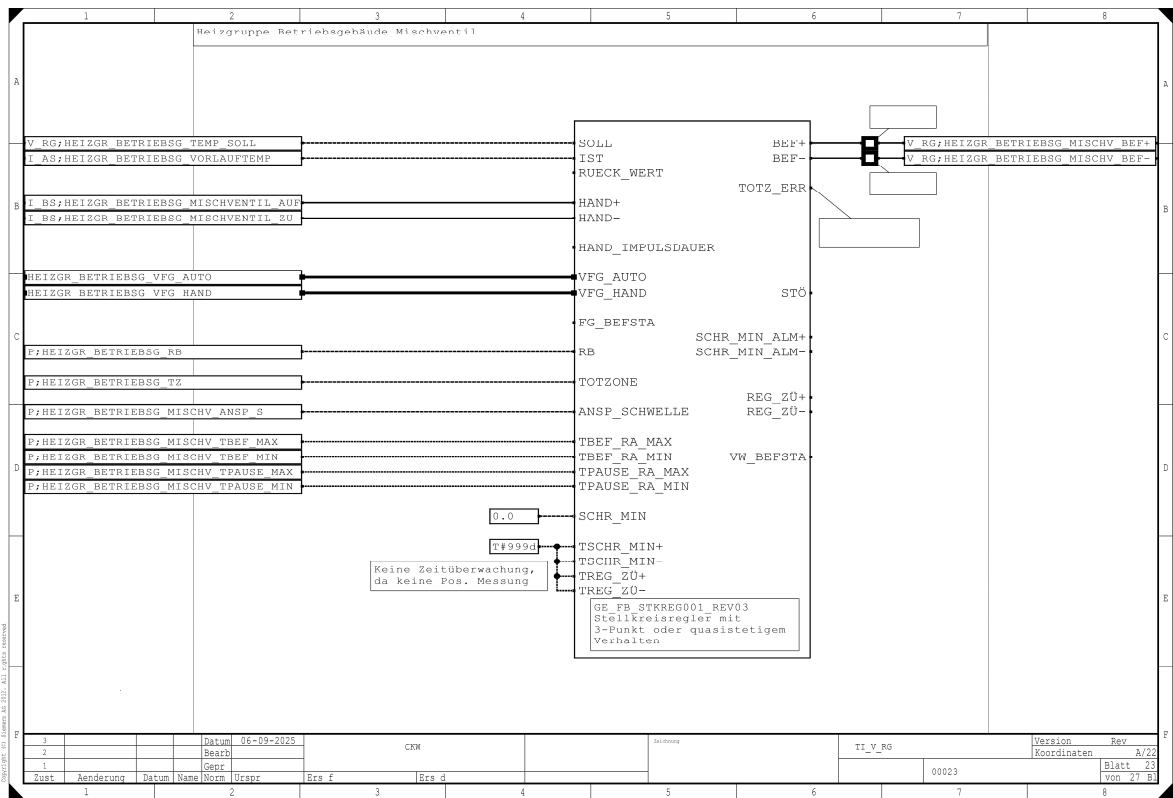


Abbildung 35: TI_V_RG, Seite 20, Mischventil, Heizgruppe Betriebsgebäude

5.1.4 TI_V_ES

In der Typinstanz für die Einzelsteuerung (TI_V_ES) werden sämtliche Aufgaben im Zusammenhang mit der Steuerung einzelner Aggregate, deren Anwahl, Staffellung sowie den zugehörigen Unterautomatiken abgebildet. Analog zur Typinstanz für die Regelung existieren auch hier keine direkten Ein- oder Ausgänge; die Steuerungsprozesse greifen stattdessen direkt auf globale Variablen und globale Parameter zu.

Die Reihenfolge der einzelnen Seiten innerhalb dieser Typinstanz ist nicht strikt vorgegeben. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, thematisch zusammengehörige Funktionen zu gruppieren, um die Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit zu erhöhen.

Die Funktionsbausteine der Aggregate verfügen möglichst über standardisierte Ein- und Ausgänge. Diese sind wie folgt definiert:

AE = Automatik Ein
HE = Hand Ein
FE = Freigabe Ein
SE = Schutz Ein
ME = Rückmeldung Ein
AA = Automatik Aus
HA = Hand Aus
FA = Freigabe Aus
SA = Schutz Aus
MA = Rückmeldung Aus

NVFG = Nicht verfügbar
SPG_AUS = Betriebsspannung Aus
RES = Reset BZÜ
TEST_EIN = Testfunktion Ein
PRI_EIN = Priorität Ein
FH_SAT250 = Freigabe Hand 250
TBE = Überwachungszeit Befehl Ein
TBA = Überwachungszeit Befehl Aus

BE = Befehl Ein
BA = Befehl Aus
BEREIT = Aggregat bereit
TEST_AKTIV = Testfunktion aktiv
FPE = Fehler Position Ein
FPA = Fehler Position Aus
FRG_HAND = Freigabe Hand
ZAA = Schnittstelle Redundanzst.

Abbildung 36: Übersicht der Abkürzungen bei TI_V_ES

5.1.4.1 Elektrodurchlauferhitzer

Die Steuerungslogik des Elektrodurchlauferhitzers ist durch eine klar strukturierte Abfolge von Bedingungen und Funktionsmodulen gekennzeichnet (siehe Abbildung). Im ersten Schritt werden die Einschaltbedingungen geprüft. Dabei besitzen die Wärmepumpen stets Priorität: Der Elektrodurchlauferhitzer wird nur aktiviert, wenn beide Wärmepumpen nicht verfügbar sind oder eine kritische Untertemperatur im Speicher unterschritten wird. Weitere Bedingungen, wie die Betriebsbereitschaft der Pumpen und die Stellung des Drehschalters, werden ebenfalls berücksichtigt.

Sind sämtliche Einschaltbedingungen erfüllt und wird das Aggregat „Elektrodurchlauferhitzer“ als betriebsbereit bewertet, erfolgt die Freigabe der Heizleistung. Die Steuerung berechnet daraufhin die erforderliche Heizleistung und übergibt diese an die Heizstufenverwaltung. In der Heizstufenverwaltung wird gezielt der Heizstab mit den geringsten Betriebsstunden aktiviert, um einen gleichmässigen Verschleiss aller Heizstäbe zu gewährleisten. Beim Abschalten wird entsprechend der Heizstab mit den höchsten Betriebsstunden bevorzugt deaktiviert.

Nach dem Abschalten des Elektrodurchlauferhitzers bleibt die zugehörige Pumpe für eine definierte Nachlaufzeit (15 Minuten) weiterhin aktiv. Dies stellt eine sichere und effiziente Restwärmeabfuhr sicher.

Die nachfolgende Grafik bietet eine Gesamtübersicht der Steuerungslogik und zeigt die wichtigsten Zusammenhänge sowie Abläufe im Betrieb des Elektrodurchlauferhitzers:

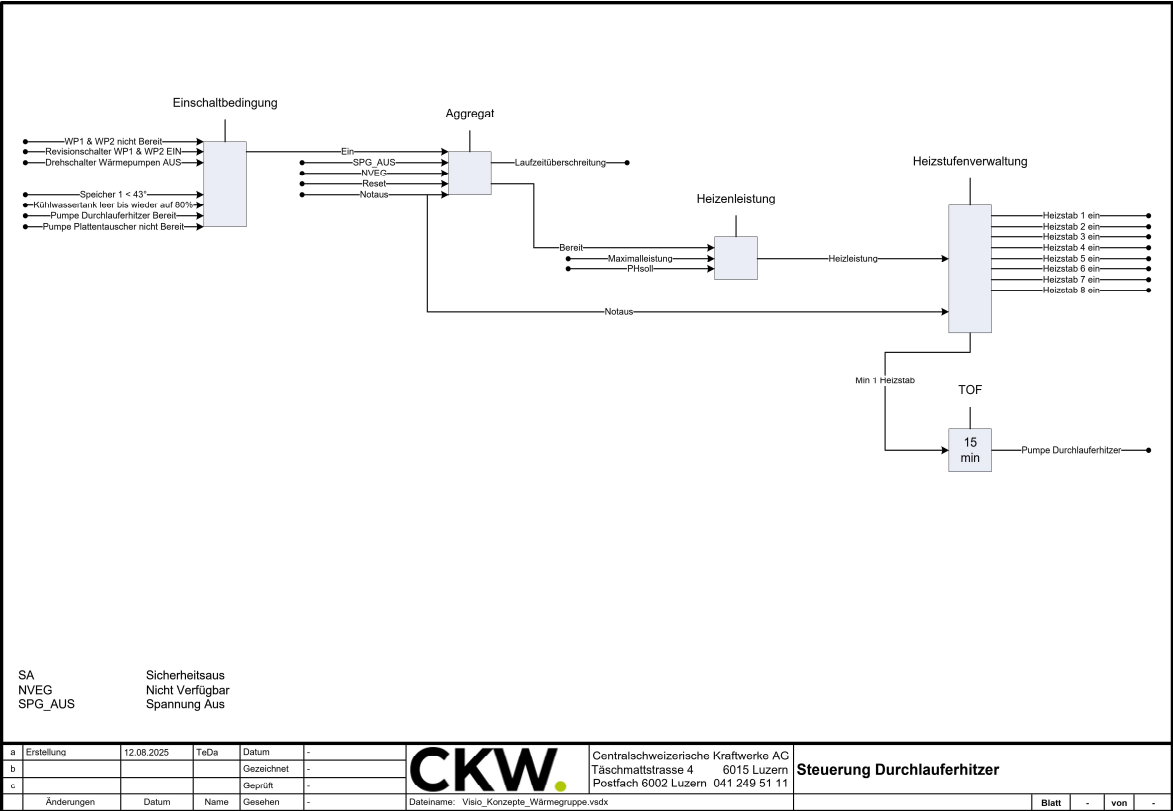


Diagramm 10: Übersicht Elektrodurchlauferhitzer

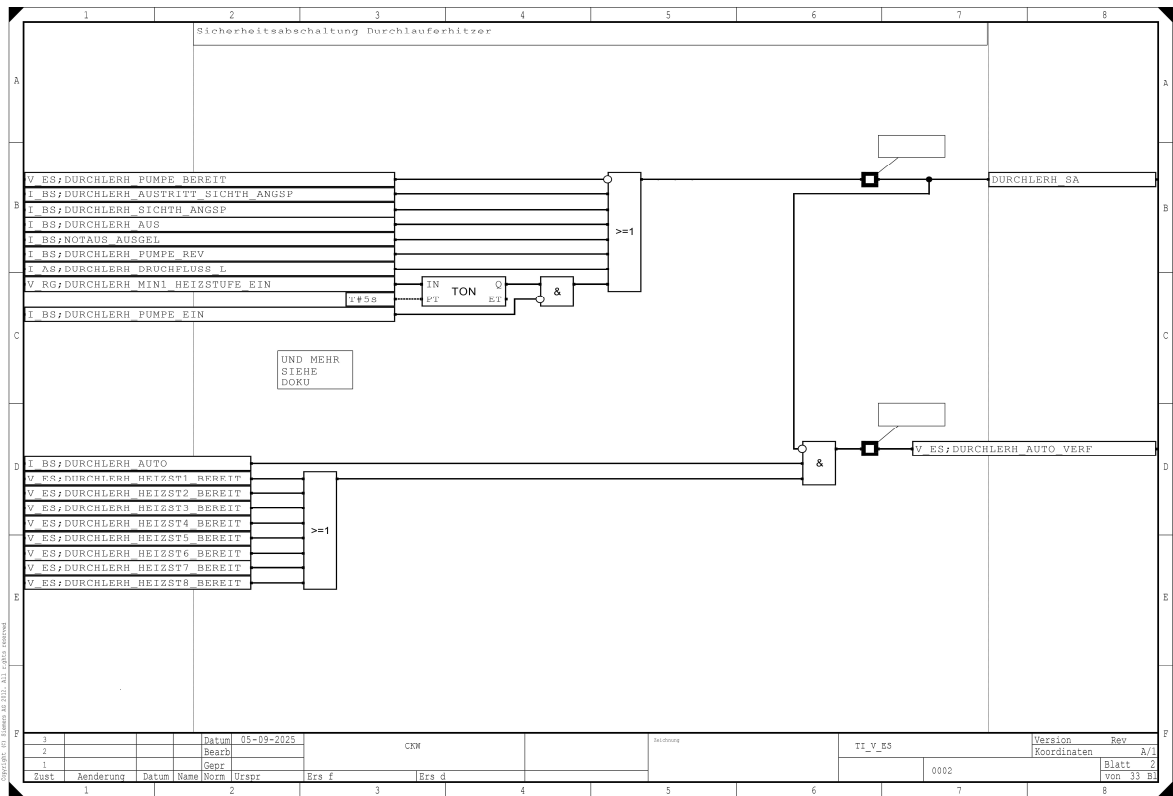


Abbildung 37: TI_V_ES, Seite 2, Sicherheitsabschaltbedingungen, Elektrodurchlauferhitzer



Copyright © Siemens AG 2012. All rights reserved.

5.1.4.2 Heizgruppe Wohnkolonie

In der Wohnkolonie sind die Förderpumpen redundant ausgeführt, es sind zwei Pumpen vorhanden, von denen jeweils nur eine aktiv betrieben wird. Um einen gleichmässigen Verschleiss beider Pumpen sicherzustellen, erfolgt alle 24 Stunden ein automatischer Wechsel der aktiven Pumpe.

Im Fehlerfall, zum Beispiel bei einer Störung einer Pumpe, übernimmt die verbleibende betriebsbereite Pumpe automatisch den Betrieb. In diesem Zustand bleibt diese Pumpe dauerhaft aktiv, unabhängig davon, wie viel Zeit seit dem letzten Wechsel vergangen ist. Ein erneuter Wechsel findet erst statt, wenn der Fehler behoben und beide Pumpen wieder störungsfrei verfügbar sind.

Dieser Fehlerfall wird in der Visualisierung als Warnung angezeigt, sodass eine schnelle Störungsbehebung gewährleistet ist.

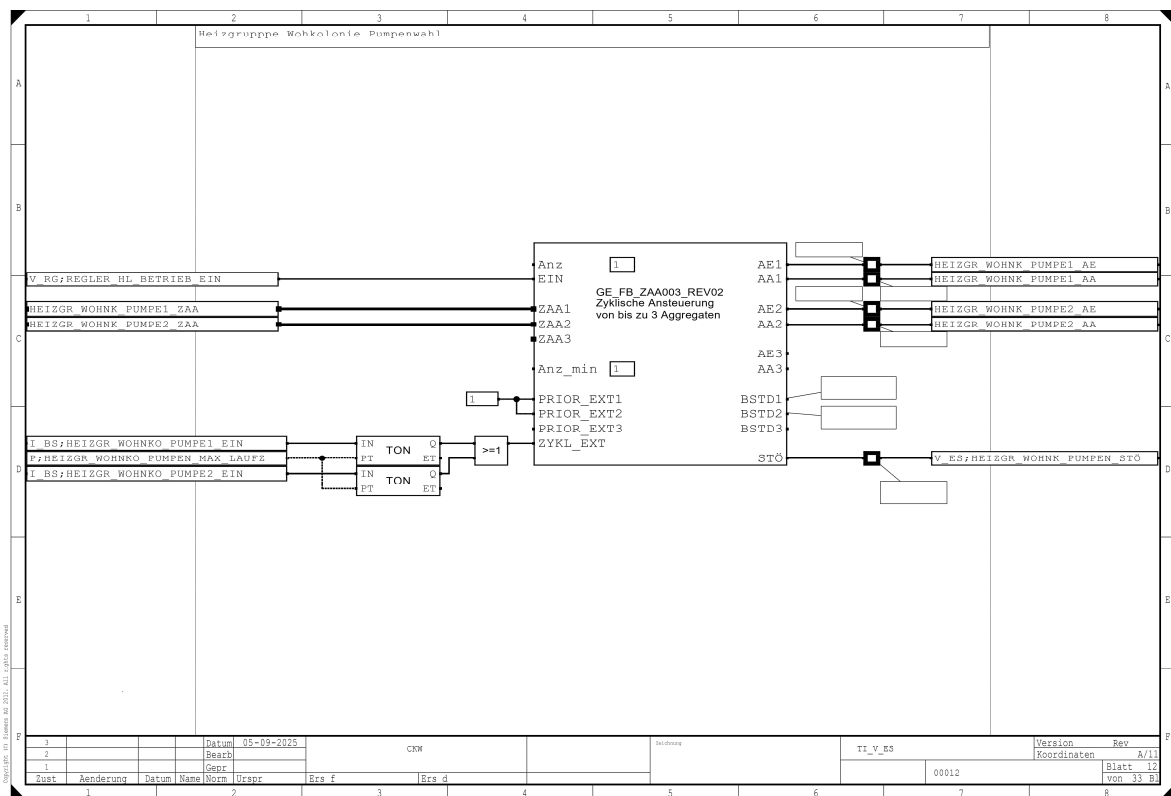


Abbildung 40: TI_V_ES, Seite 12, Pumpenwahl der Wohnkolonie

Die Pumpen der Heizgruppe Wohnkolonie und auch die Pumpen aller anderen Heizgruppen werden ähnlich nach dem in der folgenden Abbildung dargestellten Prinzip angesteuert.

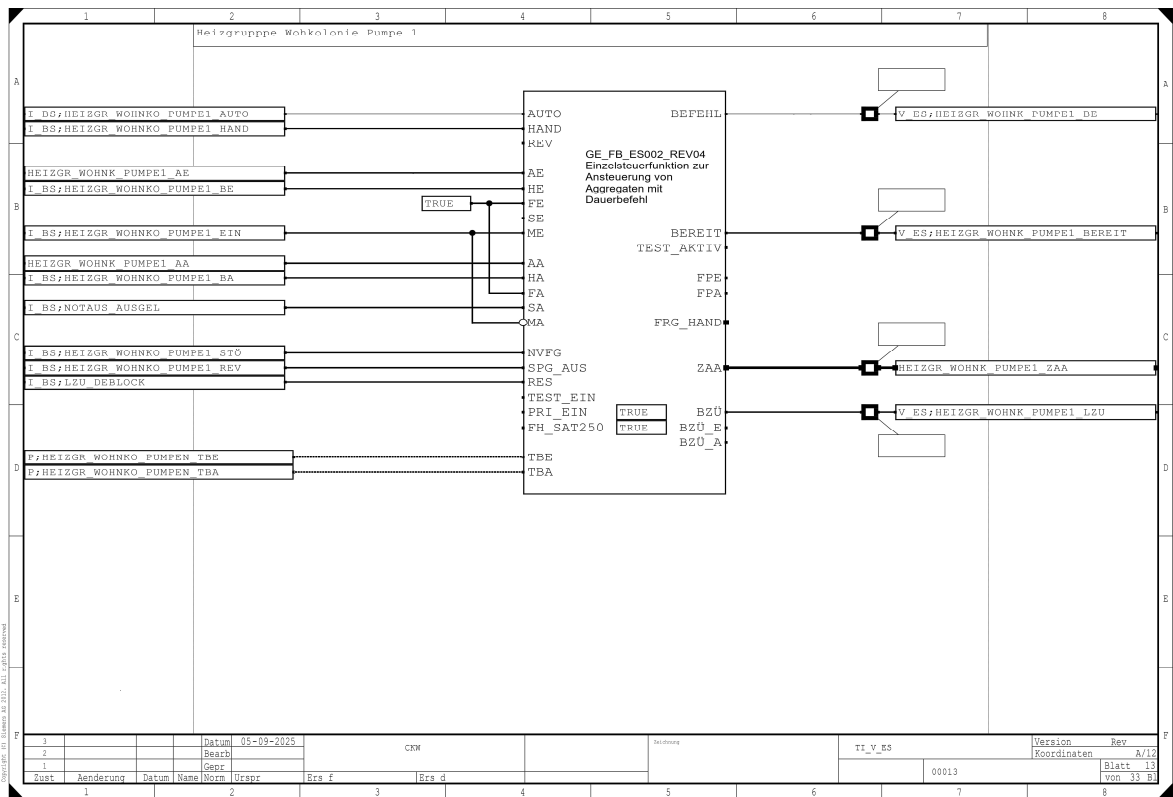


Abbildung 41: TI_V_ES, Seite 13, Einzelsteuerung Pumpe der Wohnkolonie

5.1.4.3 Wärmepumpe

Im Vergleich zum Elektrodurchlauferhitzer ist die Steuerung der Wärmepumpe deutlich komplexer. Dies liegt unter anderem daran, dass mehrere zusätzliche Peripheriegeräte integriert sind, die einen direkten Einfluss auf die Betriebsbereitschaft der Wärmepumpe haben. Darüber hinaus wurde eine gesteuerte Trigger Funktion implementiert, die bei einer Stufenanpassung der Heizleistung die zugehörigen Pumpen automatisch auf einen neuen Drehzahlsollwert einstellt.

Bei einer Erhöhung der Heizstufe wird zudem das Mischventil für 60 Sekunden vollständig geöffnet, bevor auf die nächste Stufe umgeschaltet wird. Erst nach Ablauf dieser Zeit erfolgt das Umschalten. Für diese Abläufe wurde ein eigenes Makro entwickelt, da die Koordination aller Bedingungen ausserhalb eines solchen Makros nicht sinnvoll und schwerer umsetzbar gewesen wäre.

Die folgende Grafik zeigt die Übersicht der gesamten Steuerungslogik der Wärmepumpe:

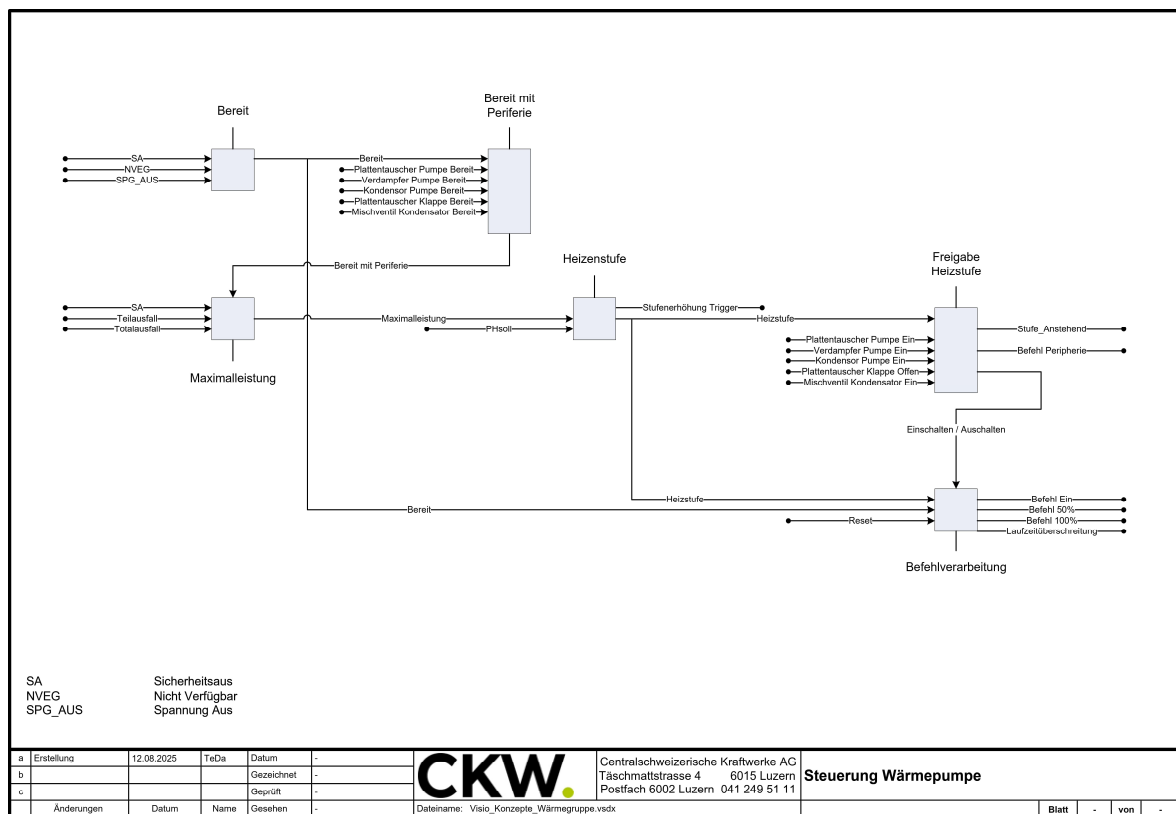


Diagramm 11: Übersicht Wärmepumpe

Die Klappe des Plattentauschers der zugehörigen Wärmepumpe wird zunächst geöffnet. Sobald die Offen-Position erreicht ist, bleibt das Öffnungssignal für weitere zehn Sekunden aktiv, um sicherzustellen, dass der Klappenmotor die Endstellung zuverlässig erreicht und die Klappe vollständig geöffnet ist. Sollte beim Öffnen eine Störung auftreten, wird die Klappe automatisch wieder geschlossen. Ein erneuter Öffnungsvorgang ist erst nach einer Laufzeit Deblockierung möglich.

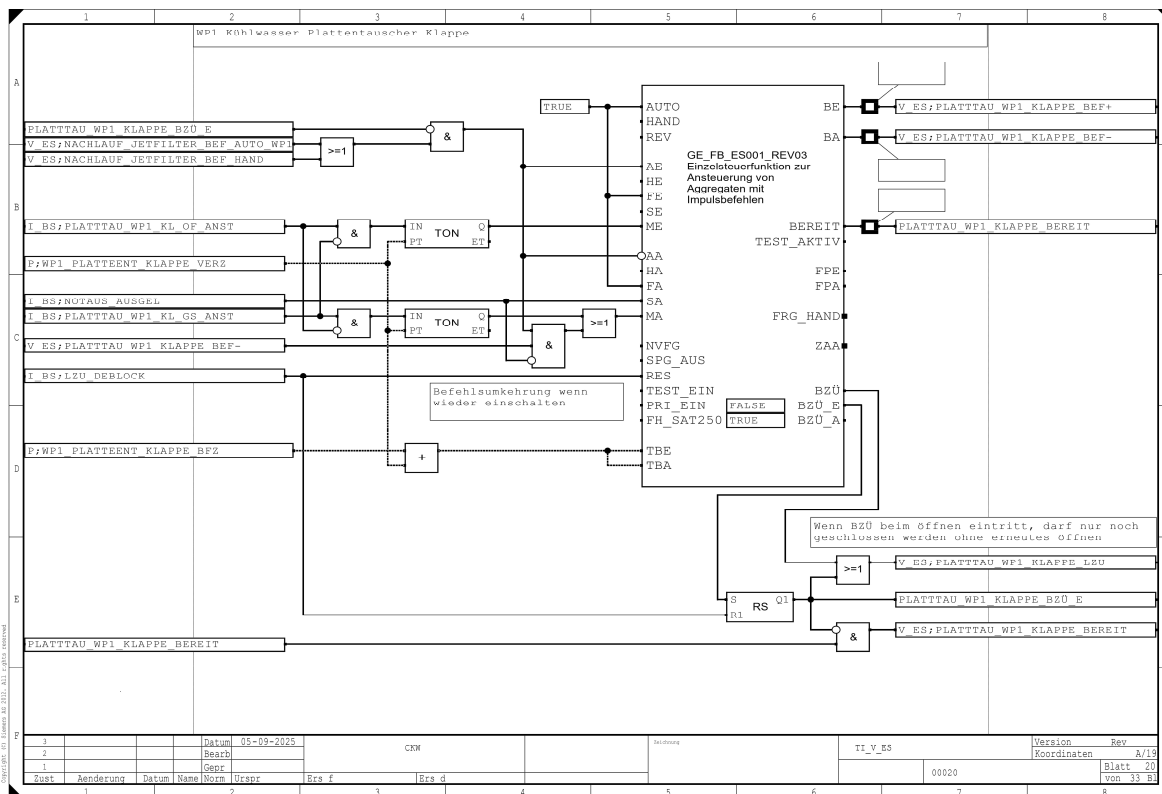


Abbildung 42: TI_V_ES, Seite 20, Einzelsteuerung der Plattentauscher Klappe

Die Auswahl der Wärmepumpe wurde anhand dieser Tabelle, welche in der Betriebsanleitung definiert ist, erstellt:

Tabelle 1: Leistung der Wärmepumpen laut Betriebsanleitung

PH _{Soll} [kW]	Leistung Wärmepumpe	Anzahl WP Betrieb ¹⁾
0	0 %	0
85	50 %	1
170	100 %	1
255	150 %	2
340	200 %	2

Obwohl der Sachverhalt weitgehend selbsterklärend ist, wurde der untere Teil der folgenden Abbildung aufgrund der Darstellung der 150%-Stufe umfangreicher gestaltet. Bei einer Reduktion der Leistung wird zunächst die Wärmepumpe mit den meisten Betriebsstunden auf die 50%-Stufe heruntergeregelt, sodass bei einer weiteren Leistungsreduzierung wiederum die Wärmepumpe mit den meisten Betriebsstunden abgeschaltet wird.

Der Wechsel zwischen den Leistungsstufen erfolgt erst, wenn der Sollwert die Schwelle zur nächsttieferen beziehungsweise nächsthöheren Stufe unterschreitet oder überschreitet. Dadurch entsteht eine Hysterese von 85 kW.

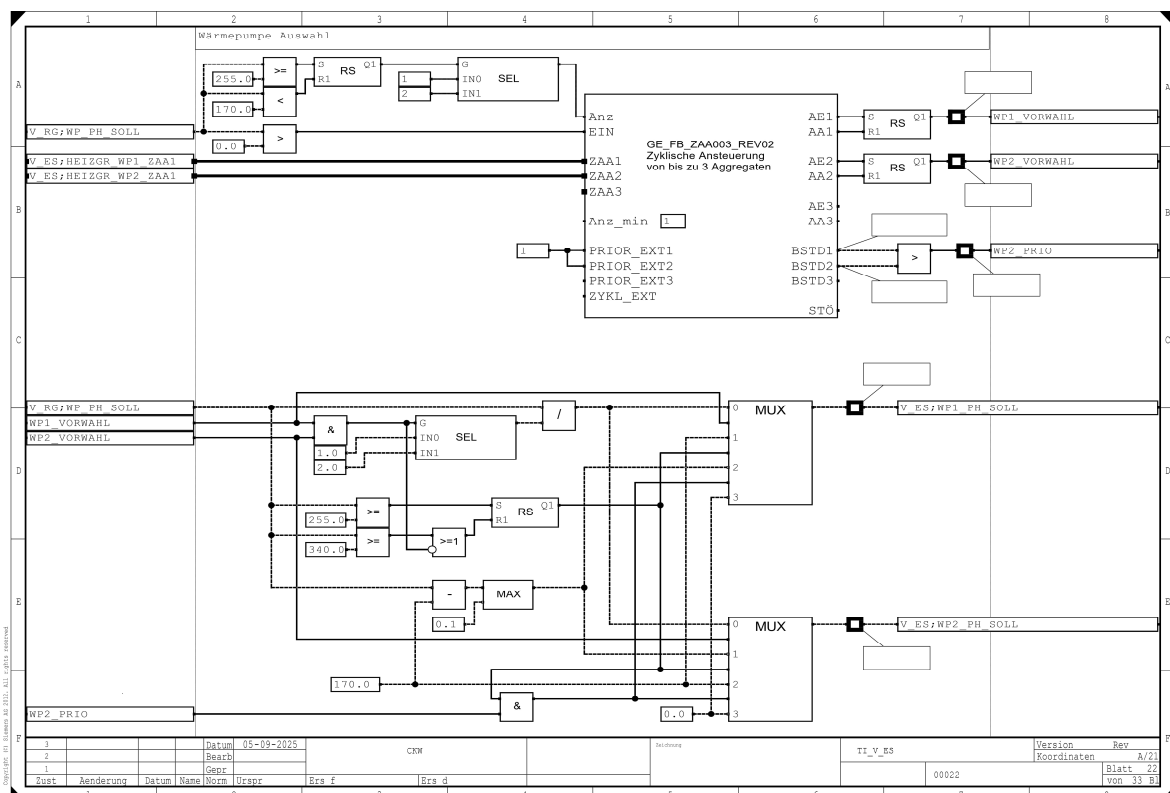


Abbildung 43: TI_V_ES, Seite 22, Auswahl der Wärmepumpen

Das Kernstück der Steuerung jeder einzelnen Wärmepumpe ist in einem Makro implementiert. Dieses Makro prüft zunächst die Betriebsbereitschaft aller erforderlichen Peripheriegeräte und bestimmt anhand des Sollwerts PH_SOLL die jeweils korrekte Leistungsstufe 0 %, 50 % oder 100 %. Je nach Verfügbarkeit werden sowohl die maximale als auch die aktuelle Heizleistung als Signale ausgegeben.

Auch im Fall eines Teilausfalls bleibt das Makro funktionsfähig und überträgt weiterhin alle relevanten Informationen an die nachfolgenden Steuerungen. Zusätzlich generiert das Makro Trigger-Signale für eine Anhebung oder Absenkung der Leistungsstufe.

Sobald eines der erforderlichen Geräte nicht mehr betriebsbereit ist, wird die Wärmepumpe sofort gestoppt, die maximale Heizleistung auf null reduziert und eine entsprechende Meldung an die Visualisierung übermittelt.

Die Funktionsweise und Signalführung dieses Makro ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

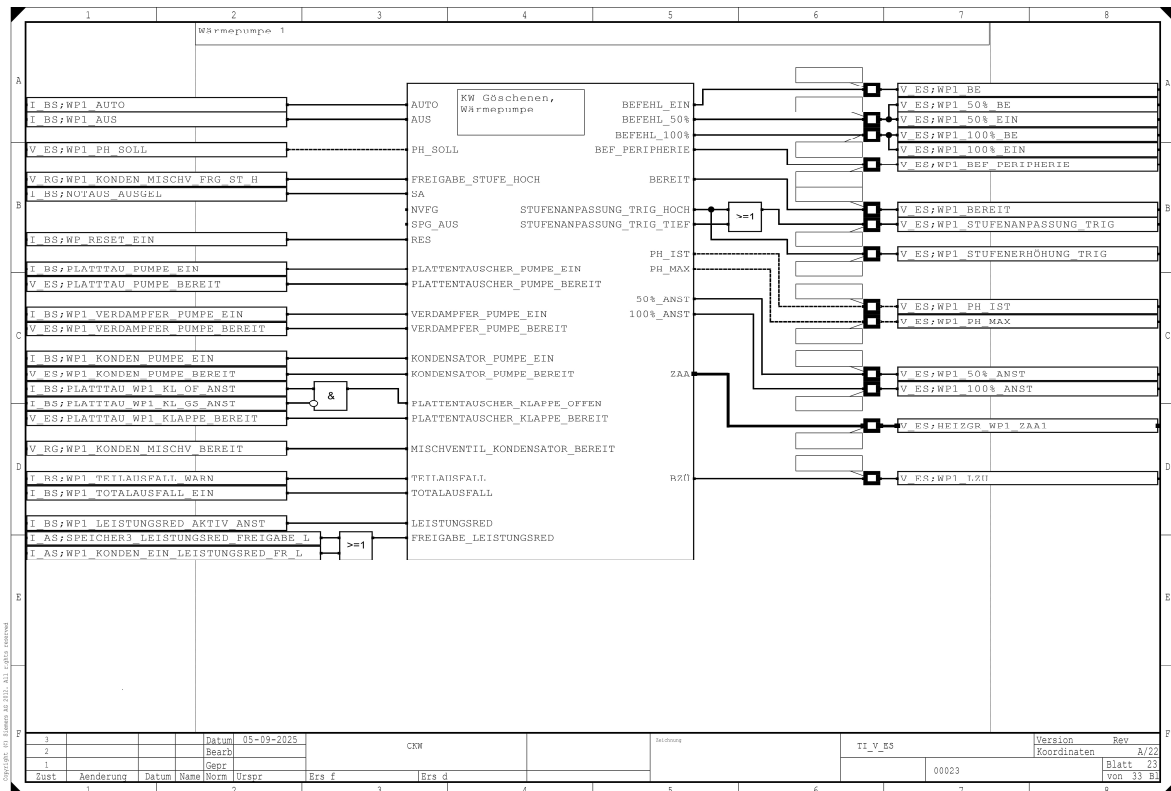
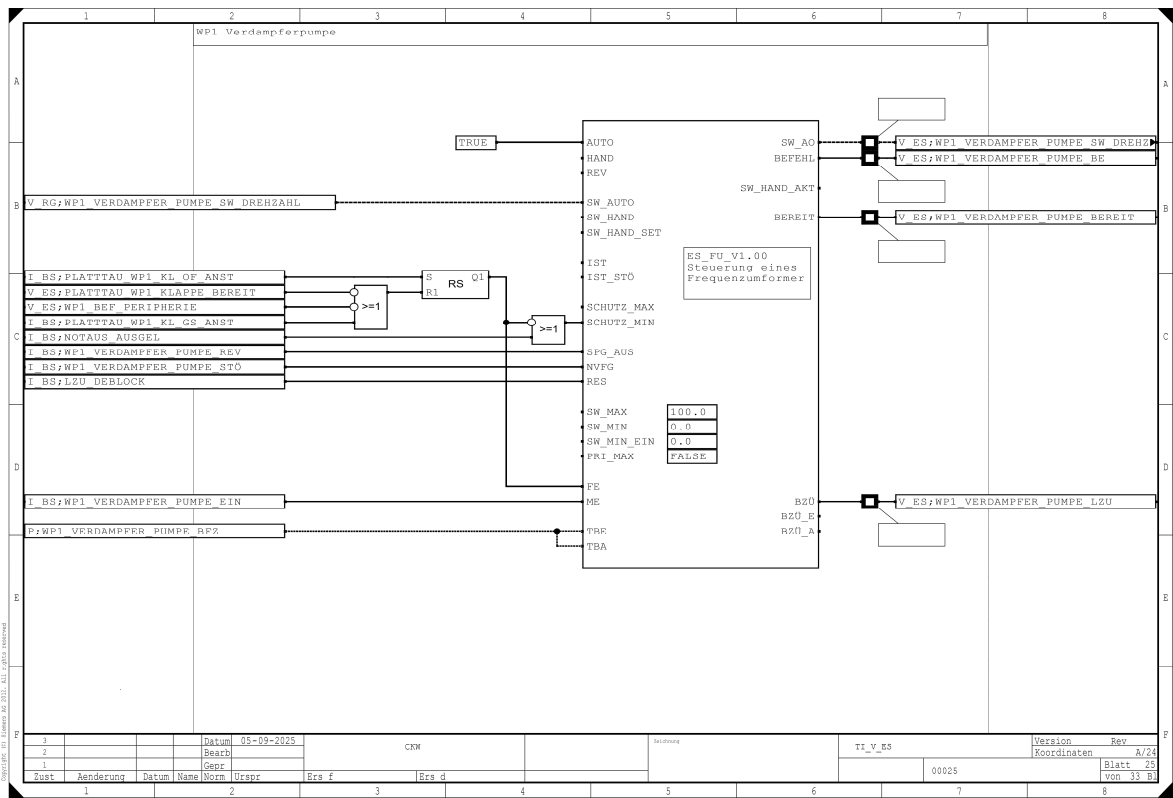


Abbildung 44: Ti_V_ES, Seite 23, selbsterstelltes Wärmepumpenmakro

Abschliessend erfolgt die Ansteuerung der Verdampferpumpe sowie der Kondensatorpumpe. Beide Pumpen werden mit einem Sollwert angesteuert, der im Regelungsteil mittels eines PI-Reglers berechnet wird. Über die SCHUTZ_MIN-Eingänge wird sichergestellt, dass die Pumpen bei Ausfall wichtiger Komponenten entweder gar nicht erst einschalten oder sofort abgeschaltet werden.

In der folgenden Abbildung ist das Steuerungsschema der Verdampferpumpe dargestellt. Die Ansteuerung der Kondensatorpumpe erfolgt nach einem nahezu identischen Prinzip.



5.1.4.4 Umwälzpumpe Plattentaucher

Die Umwälzpumpe des Plattentauchers stellt ein zentrales Peripheriegerät dar, da ihr Betrieb direkten Einfluss auf beide Wärmepumpen hat. Im Falle einer Störung oder eines Ausfalls der Umwälzpumpe wird die Wärmeerzeugung automatisch auf den Elektrodurchlauferhitzer umgeschaltet, um die Versorgungssicherheit jederzeit zu gewährleisten.

Vor dem Start der Umwälzpumpe prüft die Steuerung, ob mindestens eine der zugehörigen Klappen vollständig geöffnet ist. Nur wenn diese Voraussetzung erfüllt ist, kann die Pumpe in Betrieb gehen. Ebenfalls ist in der Steuerung ein vorzeitiger Befehl für den Jetfilter integriert. Im normalen Betrieb wird dieser Befehl bereits 30 Sekunden vor dem eigentlichen Abschalten der Umwälzpumpe ausgelöst. Dadurch wird sichergestellt, dass der Jetfilter rechtzeitig gereinigt wird, bevor die Pumpe abschaltet und somit eine optimale Betriebsbereitschaft der Anlage gewährleistet bleibt.

Für Entleerungszwecke der Kühlwassertanks wurde zusätzlich ein Handbetrieb implementiert. In diesem Modus kann die Umwälzpumpe unabhängig vom Automatikbetrieb manuell gesteuert werden, wodurch ein gezieltes Entleeren der Tanks ermöglicht wird.

In den nachfolgenden zwei Abbildungen wird die Funktionsweise der Umwälzpumpe Plattentaucher sowie deren Zusammenspiel mit den weiteren Komponenten anschaulich dargestellt.

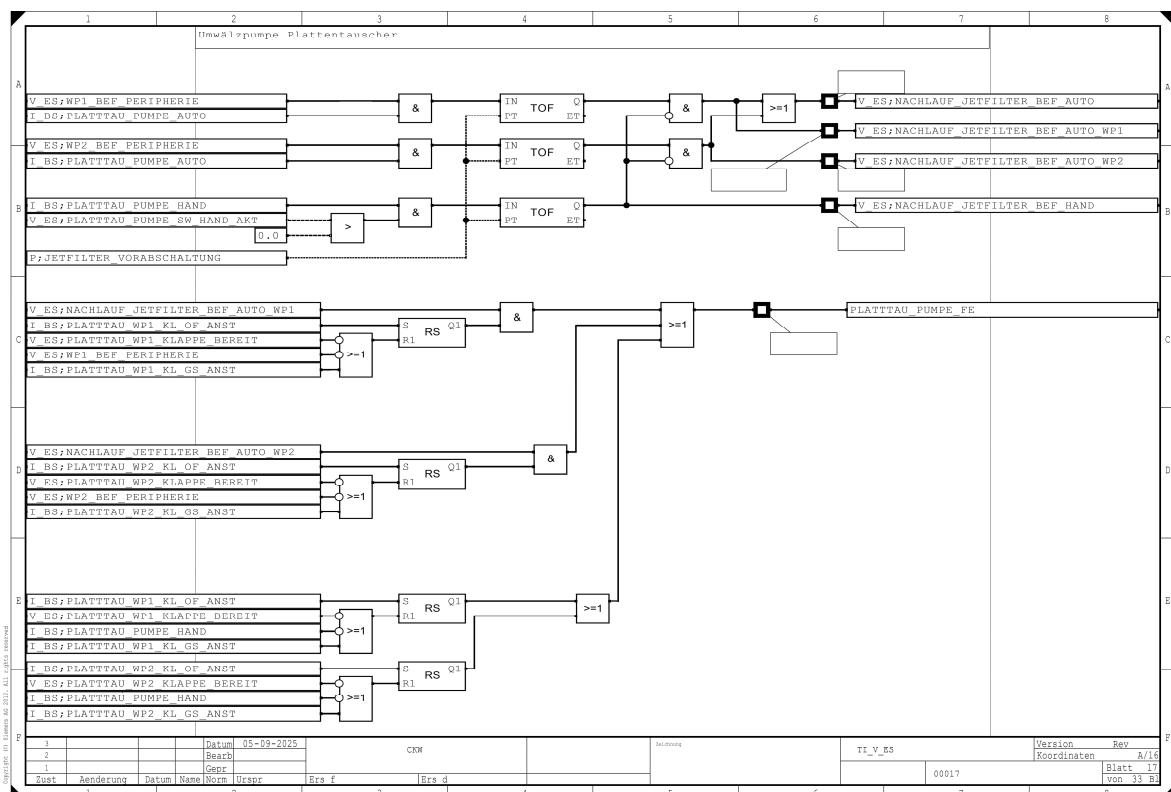


Abbildung 46: TI_V_ES, Seite 17, Freigabe der Umwälzpumpen und vorlauf des Jetfilters



David Teixeira Diplomarbeit SPS-Programmierung der Wärmegruppe von KWG AG Seite 73

5.1.4.5 Luftheizapparate im Montageturm

Die beiden Luftheizapparate im Montageturm können in zwei Leistungsstufen betrieben werden. Die Wahl der jeweiligen Stufe erfolgt basierend auf der Durchschnittstemperatur, welche von vier im Raum installierten Thermoelementen gemessen wird. Überschreitet die absolute Temperaturdifferenz einen Wert von 0,5 °C, werden die Luftheizapparate auf die zweite Stufe geschaltet. Liegt die Differenz darunter, erfolgt der Betrieb in der ersten Stufe. Die Umschaltung zwischen den Stufen erfolgt mit einer Verzögerung von zehn Sekunden.

Die Lüfter der Luftheizapparate bleiben in Betrieb, solange die Umwälzpumpe des Montageturms läuft. Die Pumpe wird abgeschaltet, sobald die Strangreguliertventile vollständig schliessen. Dies geschieht nach Erreichen der Solltemperatur, die durch die PI-Regelung vorgegeben ist. Nach dem Abschalten der Pumpe folgt eine Nachlaufzeit von fünf Minuten, nach deren Ablauf auch die Luftheizapparate vollständig deaktiviert werden.

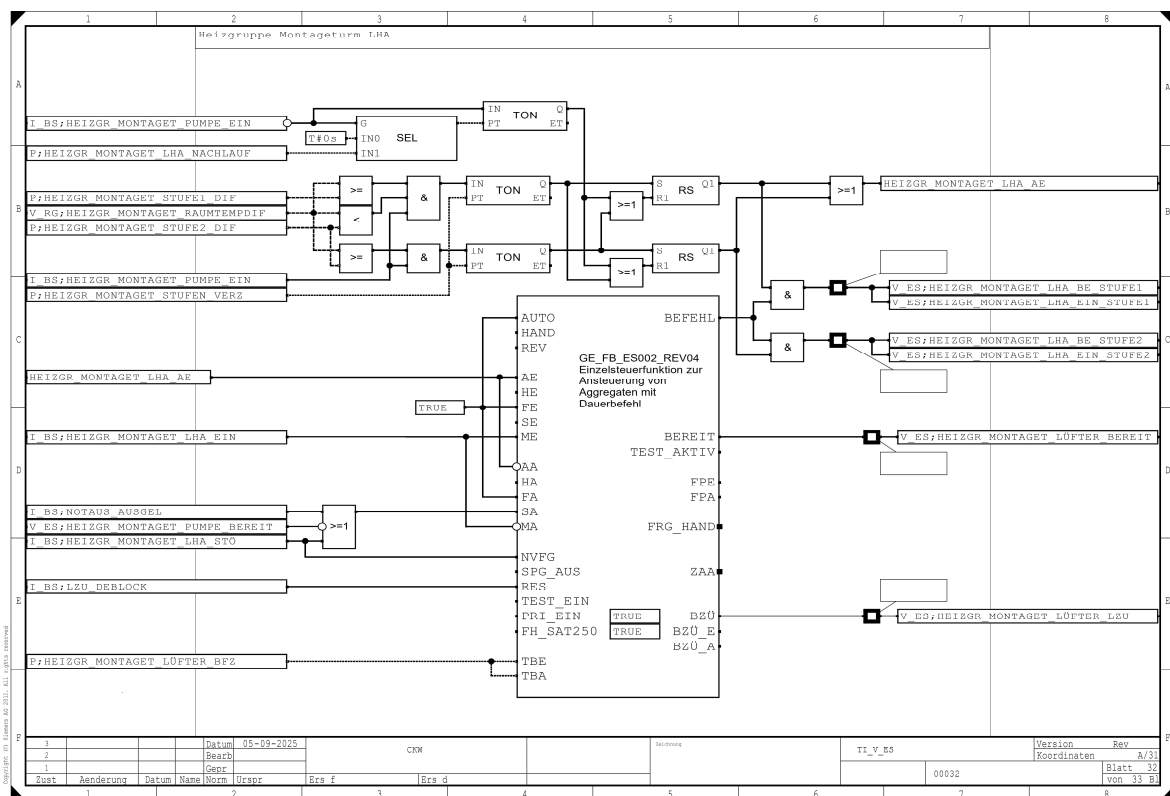


Abbildung 48: TI_V_ES, Seite 32, Einzelsteuerung der Luftheizapparate

5.1.4.6 Abluftventilator vom Heizraum

Aufgrund der potenziellen Gefahr von Gasansammlungen im Heizraum wurde ein Abluftventilator installiert. Dieser ist standardmässig auf die Betriebsart „Automatik“ eingestellt, welche über einen Drehschalter ausgewählt wird. In dieser Stellung überprüft die Steuerung kontinuierlich, unter Einbezug der Gaswarnanlage, ob eine Belüftung erforderlich ist. Weitere Auslösekriterien für den Ventilator können externe Signale, beispielsweise von der Malerei oder der Raumtemperaturregelung, sein.

Im Falle eines Gasalarms wird der Ventilator automatisch auf Stufe 2 geschaltet. Dies geschieht ebenfalls, wenn die Stufe 2 manuell ausgewählt wird. Sollte sich der Schalter auf „Aus“ oder einer festen Stufe befinden, weist die Visualisierung durch eine Warnmeldung darauf hin, dass der Automatikbetrieb nicht aktiv ist. Dies dient der Betriebssicherheit und stellt sicher, dass die Lüftungsfunktion im Ernstfall zuverlässig zur Verfügung steht.

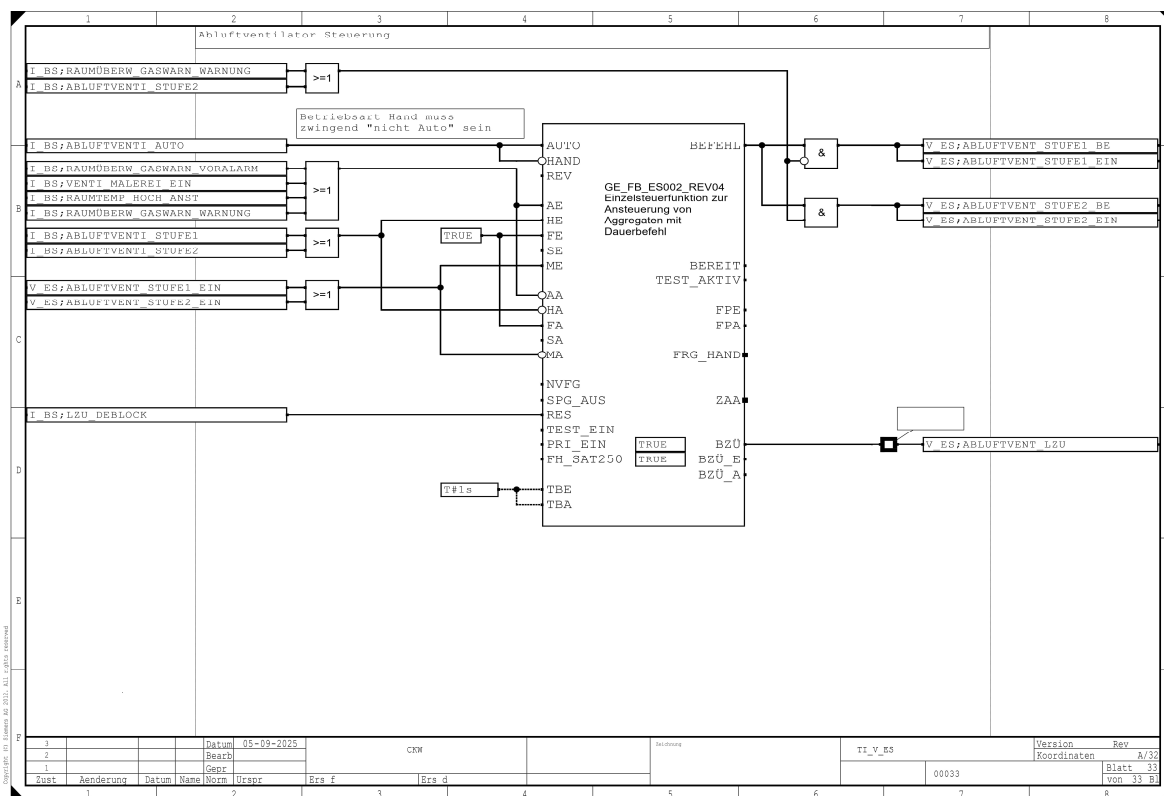


Abbildung 49: TI_V_ES, Seite 33, Einzelsteuerung des Abluftventilatoren

5.1.5 TI_O_SV

In der letzten Typinstanz werden die globalen Variablen zur Ansteuerung der Peripherie an die binären und analogen Ausgänge der SPS weitergegeben. Darüber hinaus erfolgt hier die Ausgabe der Signale an die Visualisierung sowie die Verarbeitung weiterer Kommunikations- und Telegramminformationen.

5.1.5.1 Ausgänge

Die Zuordnung orientiert sich zunächst an der Reihenfolge der Karten und I/O-Module, wobei die Signale der Baugruppe 0 der ersten Karte «0» beginnen. Anschliessend werden die Signale für die Visualisierung und die zusätzlichen Kommunikationswege strukturiert weitergeleitet, um eine klare und nachvollziehbare Signalverarbeitung zu gewährleisten. Bei grösseren Projekten, wie sie auch bei der CKW vorkommen, kann es sinnvoll sein, die Ausgänge analog zu den Eingangs-Typinstanzen nach analogen und binären Signalen zu unterscheiden, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

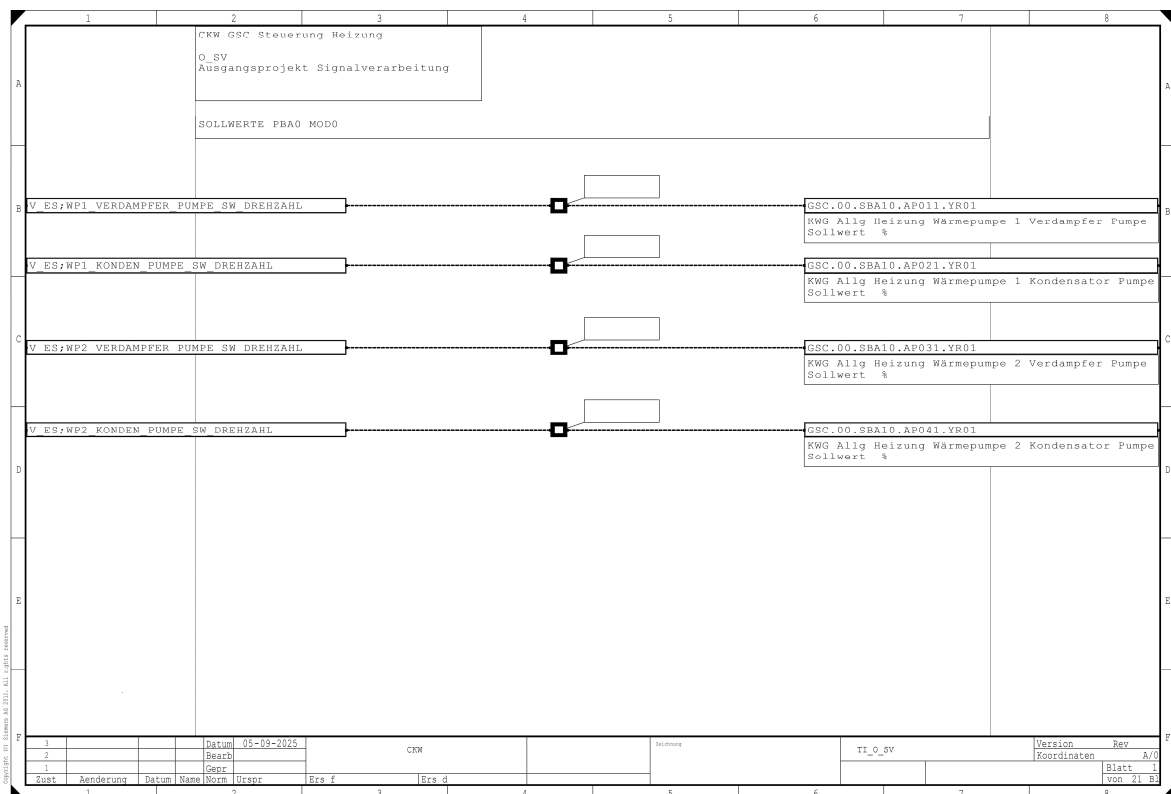


Abbildung 50: TI O SV, Seite 1, Ausgängen vom A8000 nach Baugruppe, Karte und Stecker sortiert.

Für die sichere Steuerung werden Verriegelungen eingesetzt, um Ausgänge abzufangen, die nicht gleichzeitig aktiv sein dürfen oder Werte zu verhindern, die technisch unmöglich sind, zum Beispiel negative Heizleistungen. Diese Verriegelungen sind für den Schutz der Anlage essenziell, da sie sicherstellen, dass im Fehlerfall alle relevanten Ausgänge zuverlässig abgeschaltet werden. Besonders wichtig ist, dass diese Logik nach dem Setzen von Forcemarkern greift, sodass auch bei unbeabsichtigten Steuerbefehlen, etwa wenn ein zweistufiger Lüfter versehentlich im Stern-Dreieck-Betrieb angesteuert wird oder ungültige Werte an die Visualisierung gesendet werden, kein Schaden entstehen kann. Die Umsetzung erfolgt typischerweise mit MAX- oder UND-Funktionsbausteinen, die sicherstellen, dass nur zulässige Werte und Zustände an die Ausgänge und zur Visualisierung weitergegeben werden. So wird die Betriebssicherheit auch bei ungewöhnlichen oder fehlerhaften Steuerungszuständen gewährleistet. In der folgenden Abbildung ist dies am Beispiel des Heizleistung-Sollwertes dargestellt: Mithilfe des MAX-Bausteins kann dieser Wert niemals unter 0.0 fallen.

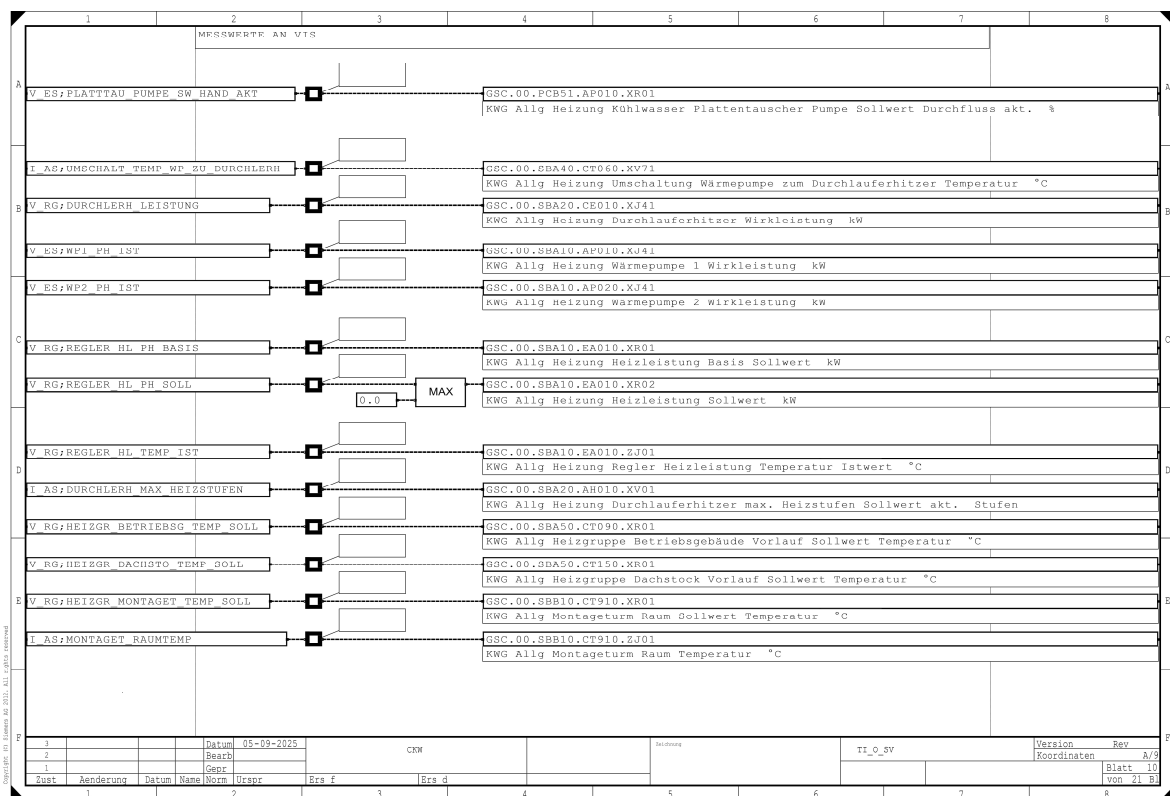


Abbildung 51: TI_O_SV, Seite 10, mit zusätzlichen Bausteinen für die Visualisierung

5.1.5.2 Sammelmeldungen

Die Sammelmeldung zur Laufzeitüberwachung wird erst in der Ausgangs-Typinstanz gebildet, um sicherzustellen, dass alle relevanten Einzelmeldungen korrekt zusammengefasst werden. Dadurch wird verhindert, dass fehlerhafte oder doppelte Meldungen bereits in den vorgelagerten Verarbeitungsschritten entstehen und die Auswertung erschweren. Die zentrale Bildung der Sammelmeldung ermöglicht eine übersichtliche und strukturierte Weitergabe an das Leitsystem sowie eine eindeutige Zuordnung im Störfall. Zusätzlich können an dieser Stelle weitere Bedingungen integriert werden.

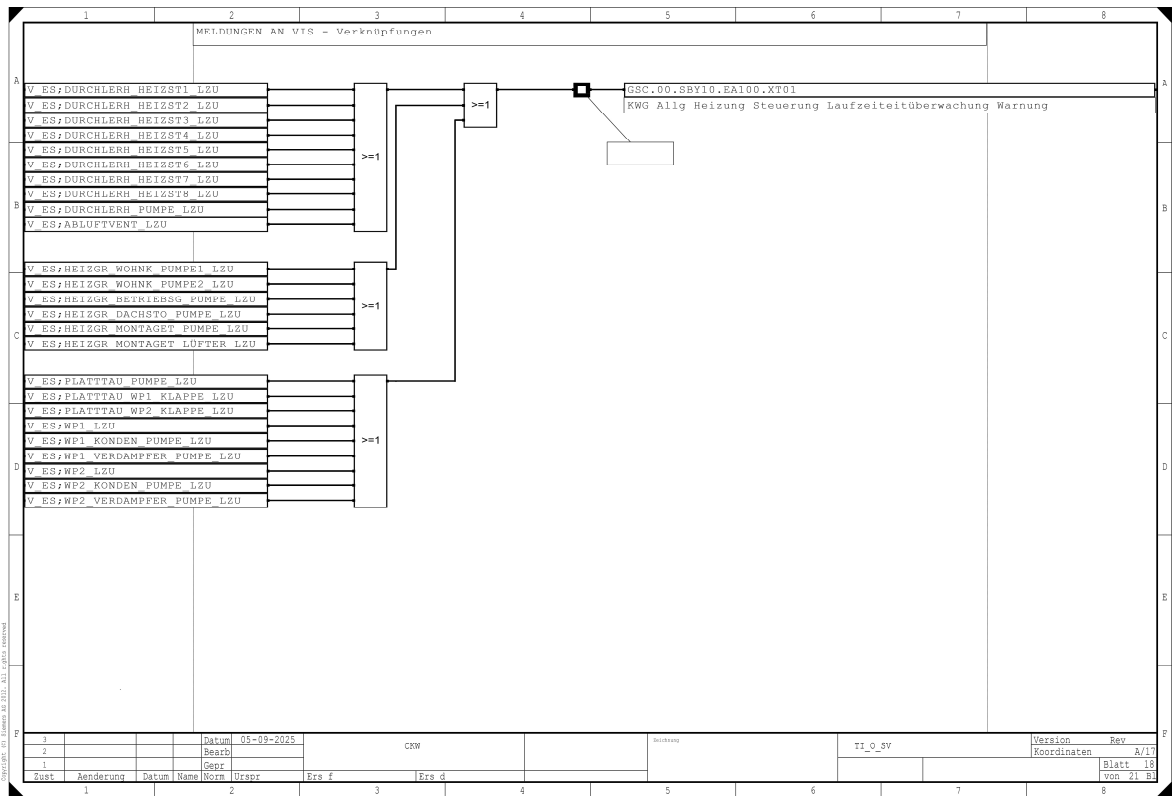


Abbildung 52: TI_O_SV, Seite 18, Verknüpfung von den Laufzeitüberschreitungen zu einer Sammelwarnung

5.2 Offline-Tests

Während des Aufbaus der Steuerung wurden in zahlreichen Zwischenschritten gezielte Offline-Tests direkt im Programm durchgeführt. Eine separate Simulation kam nicht zum Einsatz. Stattdessen wurden Force Marker verwendet, um Eingänge und ausgewählte Zwischensignale gezielt zu setzen und die Logik unter reproduzierbaren Bedingungen zu prüfen. Ausgänge und interne Zustände wurden fortlaufend überwacht.

Der Prüfungsumfang umfasste die in der Betriebsanleitung vorgesehenen Abläufe. Widersprüchliche Signale wurden bewusst erzeugt, um das Fehlermanagement sowie die sichere Rückkehr in einen definierten Zustand zu bewerten. Regler und Mischventile wurden hinsichtlich Wirkrichtung und plausibler Verläufe beurteilt; die endgültige Parametrierung erfolgt im Rahmen der Inbetriebnahme unter realen Anlagenbedingungen. Zeitfunktionen wie Nachlauf, Quittierung und Freigabeketten wurden durch serielles Forcieren überprüft.

Das Vorgehen erwies sich als wirkungsvoll. Logische Lücken, Prioritätskonflikte und fehlende Rückmeldungen konnten früh erkannt und unmittelbar korrigiert werden. Dadurch reduzierten sich Iterationen vor Ort, die Inbetriebnahme wurde beschleunigt und das Risiko unerwarteter Effekte im Betrieb sank. Der systematische Einsatz von Force Markern innerhalb der Steuerung ermöglichte eine realitätsnahe Betrachtung von Sequenzen und Zustandsübergängen, steigerte die Robustheit und Qualität der Lösung und verringerte Fehler bereits während der Entwicklung.

5.3 Simulation

Eine Simulation unterstützt die Entwicklung und Absicherung von Automatisierungslösungen bereits vor der Inbetriebnahme. In einer qualitativen Simulation werden Signalflüsse, Zustände und Abläufe mit künstlichen Testsignalen nachgebildet. Ziel ist die Verifikation von Steuerungslogik, Verriegelungen, Meldungen, Betriebsarten und Grenzfallverhalten, ohne reale Sensoren und Aktoren zu bewegen. Dadurch lassen sich logische Fehler, falsche Sequenzen, fehlerhafte Priorisierungen und fehlende Rückmeldungen frühzeitig erkennen.

Ebenso können Bedienbilder, Eingaben und Telegramme im Zusammenspiel mit der Steuerung geprüft werden. Die qualitative Simulation konzentriert sich auf korrektes Verhalten und die Reihenfolge von Aktionen, nicht auf die exakte Abbildung physikalischer Prozesse oder die parametergenaue Regelgüte. Sie verkürzt die Inbetriebnahmezeit, reduziert Risiken und erhöht die Sicherheit, weil Korrekturen vor Ort minimiert werden. Gleichzeitig ermöglicht sie reproduzierbare Testfälle was die Nachvollziehbarkeit und die Qualitätssicherung deutlich verbessert.

5.3.1 Aufbau

Es wurde eine eigene Typinstanz für die Simulation erstellt. Darin werden die Signale nachgebildet, die normalerweise der Visualisierung sowie den Ein- und Ausgängen der SPS zugeordnet sind. In der Offline-Simulation sind diese realen Schnittstellen nicht aktiv, daher können die simulierten Signale gefahrlos beschrieben werden. Globale Variablen werden bewusst nicht direkt überschrieben, um doppelte Schreibzugriffe unterschiedlicher Quellen zu vermeiden. Konflikte wie gleichzeitig TRUE und FALSE auf demselben Signal würden sonst entstehen, zumal die Simulation im Programmscan nach der Typinstanz der Ausgänge ausgeführt wird.

Die Oberfläche ist als Raster mit 5 Spalten und 2 Zeilen umgesetzt. Abgebildet sind alle relevanten Signale sowie Steuerfunktionen mit Force Markern und globale Variablen, zum Beispiel die Speichertemperaturen.

Obere Rasterzeile, Eingänge:

- Bedienung
- Störungen
- Logik Seite 1 und Logik Seite 2 mit den Temperaturen der drei Speicher mit je 0,5 °C Differenz sowie weiteren Berechnungen

Untere Rasterzeile, Ausgänge:

- Seite 1: Signale an die Visualisierung
- Seite 2: Mischventile, Klappen sowie Ausgänge von Verdampfer und Kondensatorpumpe
- Seite 3: Ausgangsstufe der Wärmepumpe

Durch die kompakte Darstellung war die Navigation schnell und Fehler sowie fehlerhafte Abläufe konnten rasch identifiziert werden.

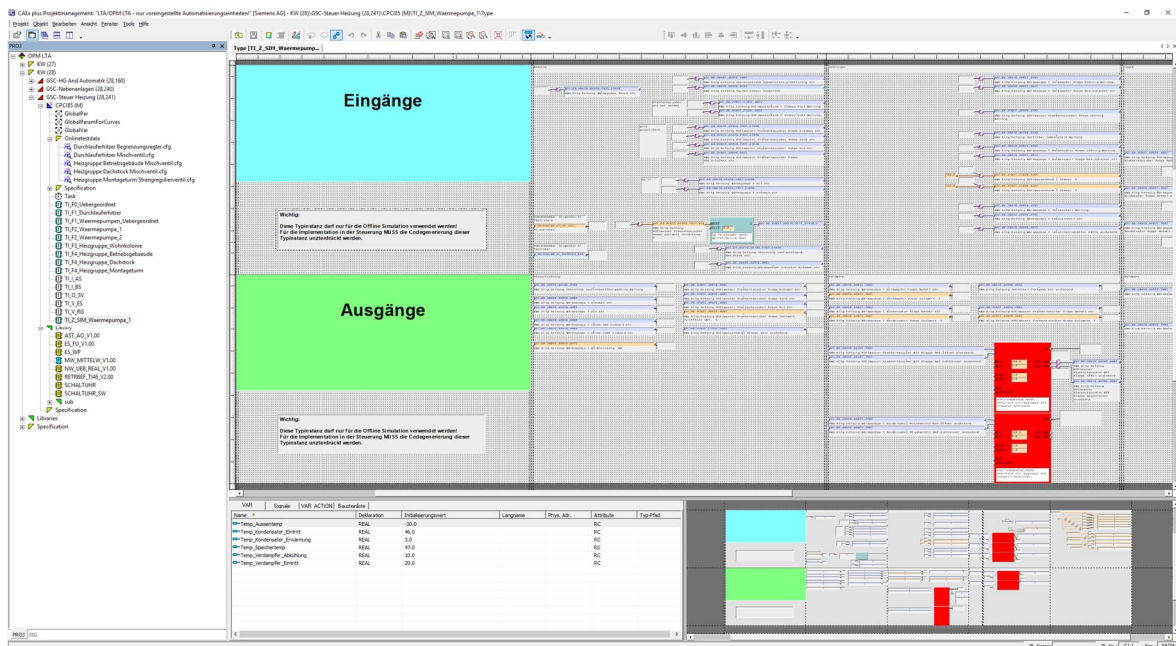


Abbildung 53: Übersicht der Simulation der Wärmepumpe

5.3.2 Tests

Die Tests wurden im Offline-Testmodus von CAExPlus durchgeführt. Grundlage bildeten die in der Betriebsanleitung beschriebenen Abläufe. Zunächst wurden die Sollabläufe ohne Störungen geprüft, darunter die korrekte Stufung der Wärmepumpe, das Ein- und Ausschaltverhalten sowie konsistente Sollwerte und Istwerte. Nach erfolgreicher Prüfung und Korrekturen folgten umfangreiche Fehlerszenarien, zum Beispiel Zeitüberschreitungen, fehlende Rückmeldungen, Grenzwertverletzungen, unzulässige manuelle Bedienungen und weitere Ausnahmen. Wichtig ist, dass es sich um eine qualitative Simulation handelt. PI-Regler und Mischventile wurden daher nur hinsichtlich Wirkrichtung und plausibler Verläufe bewertet. Die endgültigen Parameter werden bei der Inbetriebnahme vor Ort eingestellt.

5.3.3 Resultate

Die Abläufe wurden verbessert, die Steuerung robuster ausgelegt, Denkfehler aufgedeckt und an vielen Stellen optimiert. Für die Korrekturen wurden mindestens zwei Arbeitstage aufgewendet, trotz der Möglichkeit in CAExPlus, die Offline-Simulation während der Bearbeitung sofort neu zu laden. Wären diese Anpassungen erst vor Ort oder kurz vor der Inbetriebnahme erfolgt, hätte dies ein hohes Risiko dargestellt. Testfälle mit ausbleibenden Signalen, zum Beispiel aufgrund von Drahtbruch oder anderen Defekten, wurden identifiziert und nachgebessert, sodass die Steuerung nun wie vorgesehen reagiert.

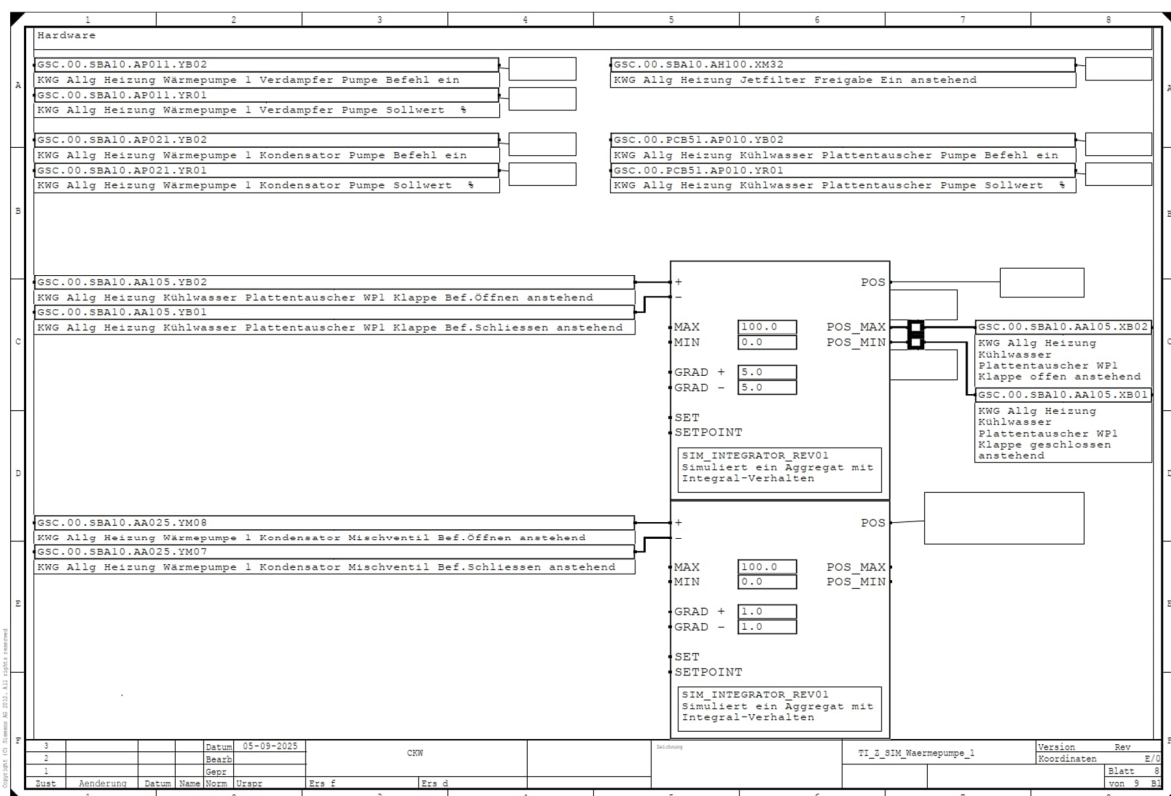


Abbildung 54: Seite mit den Ausgängen und Simulation Funktionsbausteinen

5.4 Inbetriebnahmen vor Ort

Die Inbetriebnahmen erfolgten in Kalenderwoche 34 sowie am 26. August und am 5. September. Dies wurde durchgehend von Stefan Bächer begleitet. In KW 34 wurden der Elektrodurchlauferhitzer, der übergeordnete Regler sowie die Heizgruppen des Betriebsgebäudes und des Dachstocks in Betrieb genommen. Die Peripherie der Wärmepumpe 1 wurde stichprobenartig geprüft, jedoch noch nicht vollständig in Betrieb gesetzt.

Am 26. August erfolgte die Inbetriebnahme der Heizgruppe Montageturm und des Abluftventilators im Heizraum. Am 5. September wurden die Tests an der Wärmepumpe 2 sowie an der Kombination beider Wärmepumpen inklusive Peripherie durchgeführt.

In diesem Zeitraum wurden letzte Fehler behoben, sowohl in der Software als auch in der Betriebsanleitung. Gemeinsam mit dem Betreiber wurden offene Punkte geklärt, Formulierungen präzisiert und fehlende Inhalte ergänzt. Durch die Unterstützung und die langjährige Erfahrung von Stefan Bächer konnten geeignete Regler Einstellungen häufig zügig gefunden und wirksam umgesetzt werden.

5.4.1 Reaktion Elektrodurchlauferhitzer

Ein wichtiger Erkenntnisgewinn ist das Verständnis der Systemträgheit. Um diese Information zu ermitteln, wurde ein Reaktionstest durchgeführt und mit dem Oszilloskop gemessen, wie viel Zeit zwischen dem Einschalten des ersten Heizstabes und dem Beginn des Temperaturanstiegs vergeht. Während des Tests stand das Mischventil vollständig offen, um Verzögerungen durch die Regelung auszuschliessen und den Effekt eindeutig dem System zuzuschreiben. Das Ergebnis zeigt, dass das System eine Trägheit von etwa 9 Sekunden aufweist. Diese Kenngrösse ist für die Auslegung von Regelparametern, die Bewertung von Ansprechzeiten und die Interpretation von Trendverläufen wesentlich.

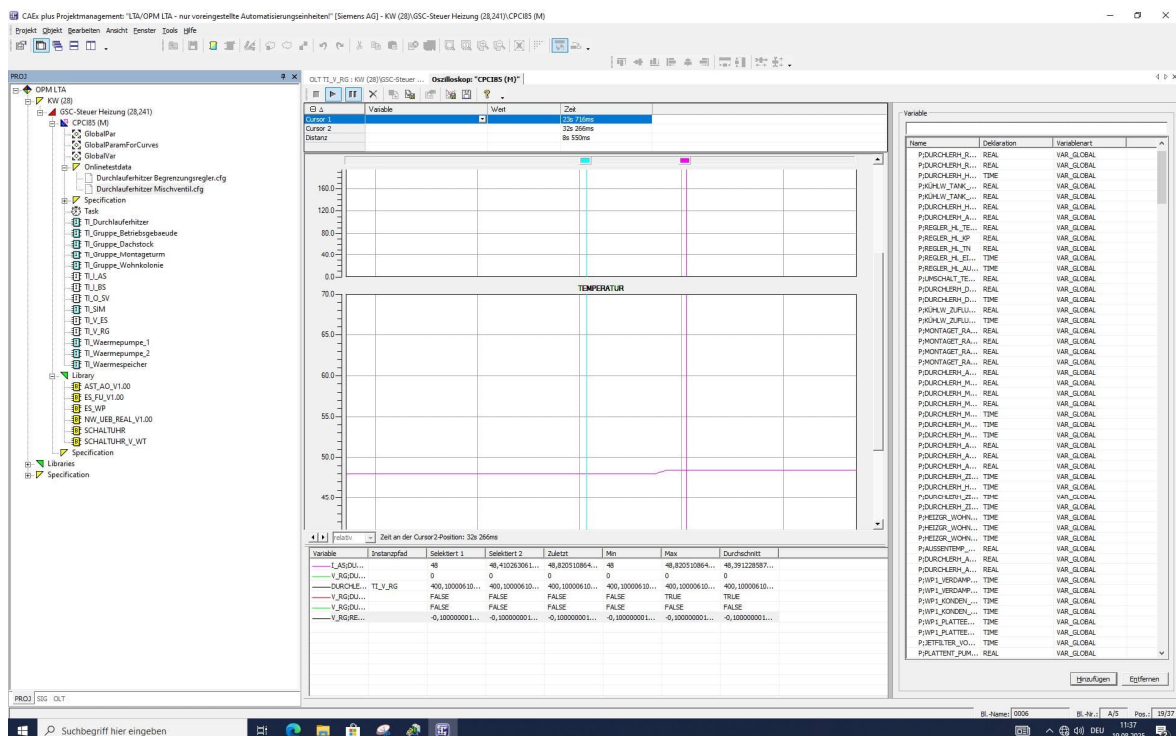


Abbildung 55: Bildschirmaufnahme Elektrodurchlauferhitzer Reaktion mit Oszilloskop

5.4.2 Mischventil Elektrodurchlauferhitzer

Das Mischventil wurde in mehreren Versuchen schrittweise optimiert. Im Fokus standen die Einstellparameter Regelbereich, Totzone, Ansprechschwelle, Befehlszeit maximal und minimal sowie Pausenzeit maximal und minimal. Ziel der Optimierung war, die Austrittstemperatur stabil bei 50 °C zu halten und Überschreitungen von 53 °C möglichst zu vermeiden.

Die Wirkung der Einstellungen wurde anhand von Messreihen bewertet. In den drei folgenden Abbildungen zeigt das obere Diagramm die Leistung, wobei der grüne Strich die aktuelle Ist-Leistung markiert. Das mittlere Diagramm stellt die Temperaturentwicklung dar. Im unteren Diagramm sind die Öffnen- und Schliessen-Befehle des Mischventils visualisiert. Unterhalb der Grafiken befindet sich eine Tabelle mit den zugehörigen Parametern und Messergebnissen.

Durch die Anpassung von Regelbereich und Totzone wurde das Takten des Ventils deutlich reduziert. Die Ansprechschwelle wurde so gewählt, dass kleine Störungen nicht zu unnötigen Stellbewegungen führen. Die Begrenzung der Befehlszeiten verhindert übermässig lange Stellimpulse und reduziert damit das Überschwingen. Definierte Pausenzeiten unterstützen ein ruhiges Regelverhalten und Lassen dem System ausreichend Zeit, auf Stellbefehle zu reagieren. Insgesamt resultiert daraus eine stabile Temperaturführung nahe 50 °C mit geringer Überschreitungstendenz und einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Dynamik und Ruhe im Stellverhalten.

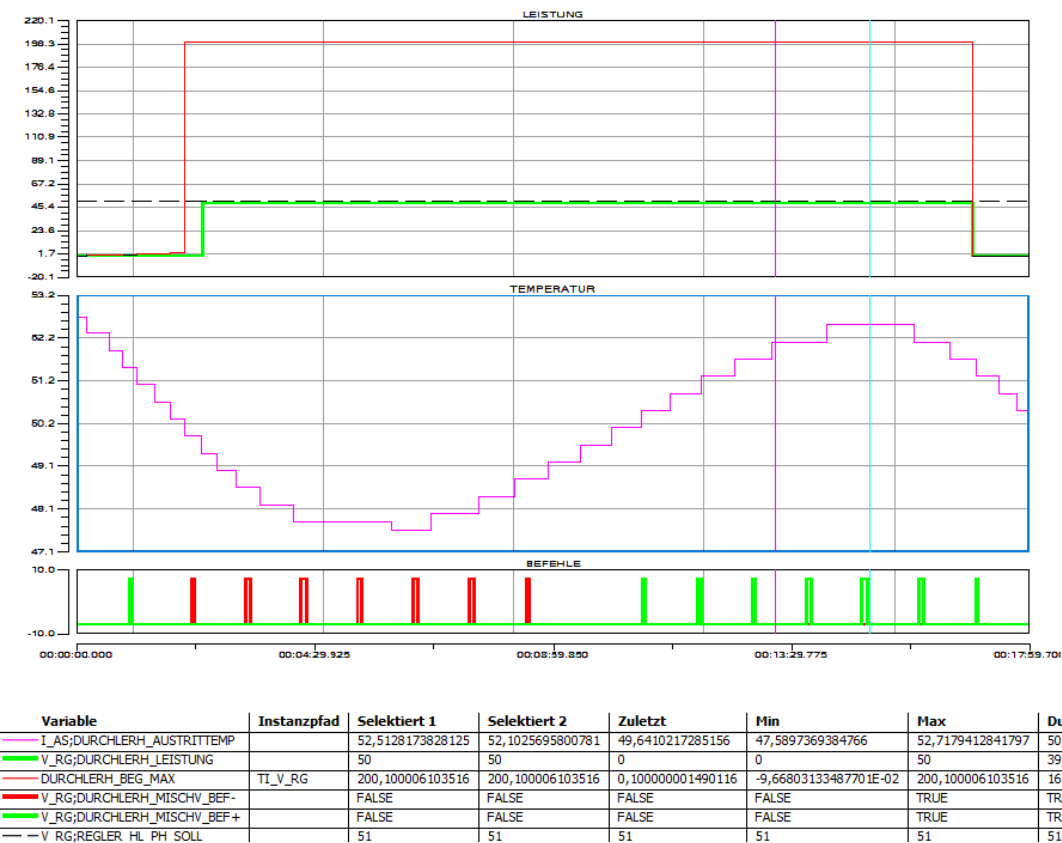
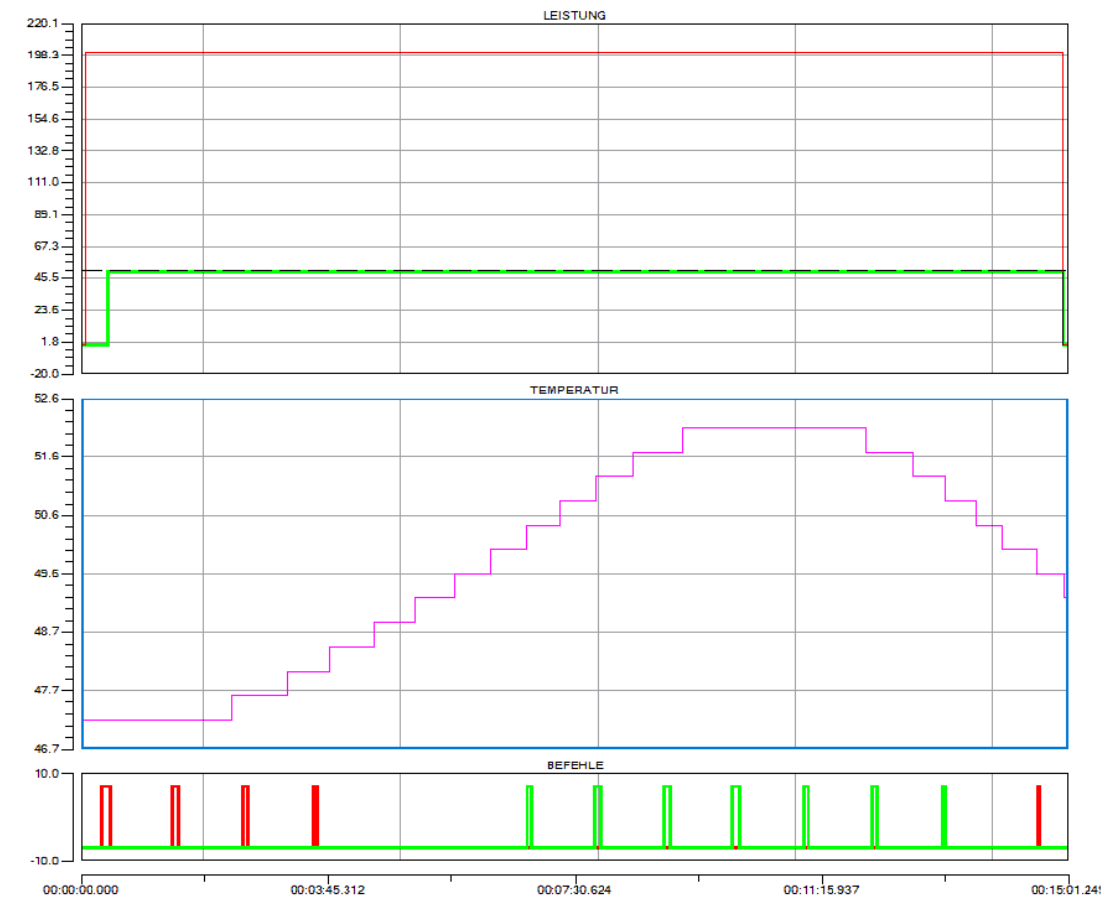


Abbildung 56: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 1, 22.08.2025, optimiert



Variable	Instanzpfad	Selektiert 1	Selektiert 2	Zuletzt	Min	Max	Durchschnitt
I_AS;DURCHLERH_AUSTRITTEMP				49,2307739257813	47,1794891357422	52,1025695800781	49,9086461828627
V_RG;DURCHLERH_LEISTUNG				0	0	50	48,3578708946772
DURCHLERH_BEG_MAX	TI_V_RG			0,100000001490116	0,100000001490116	200,100006103516	197,891625511729
V_RG;DURCHLERH_MISCHV_BE-				FALSE	FALSE	TRUE	TRUE
V_RG;DURCHLERH_MISCHV_BE+				FALSE	FALSE	TRUE	TRUE
-V_RG;REGLER_HL_PH_SOLL				51	51	51	51

Abbildung 57: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 2, 22.08.2025, optimiert

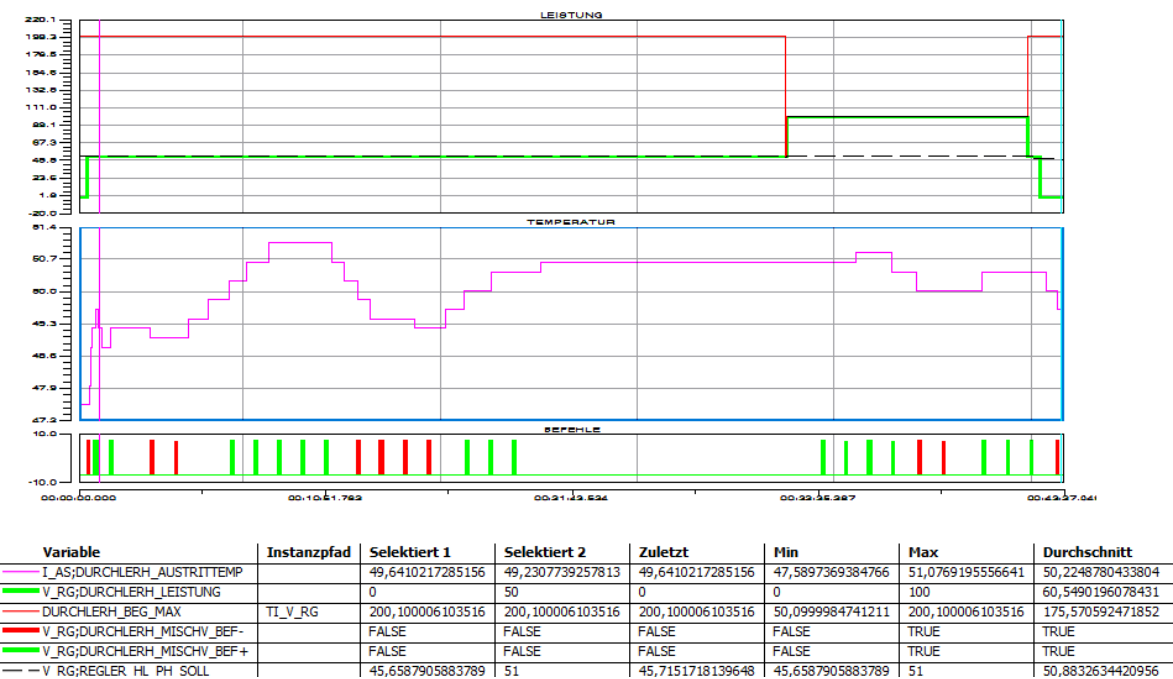


Abbildung 58: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 3, 22.08.2025, optimiert

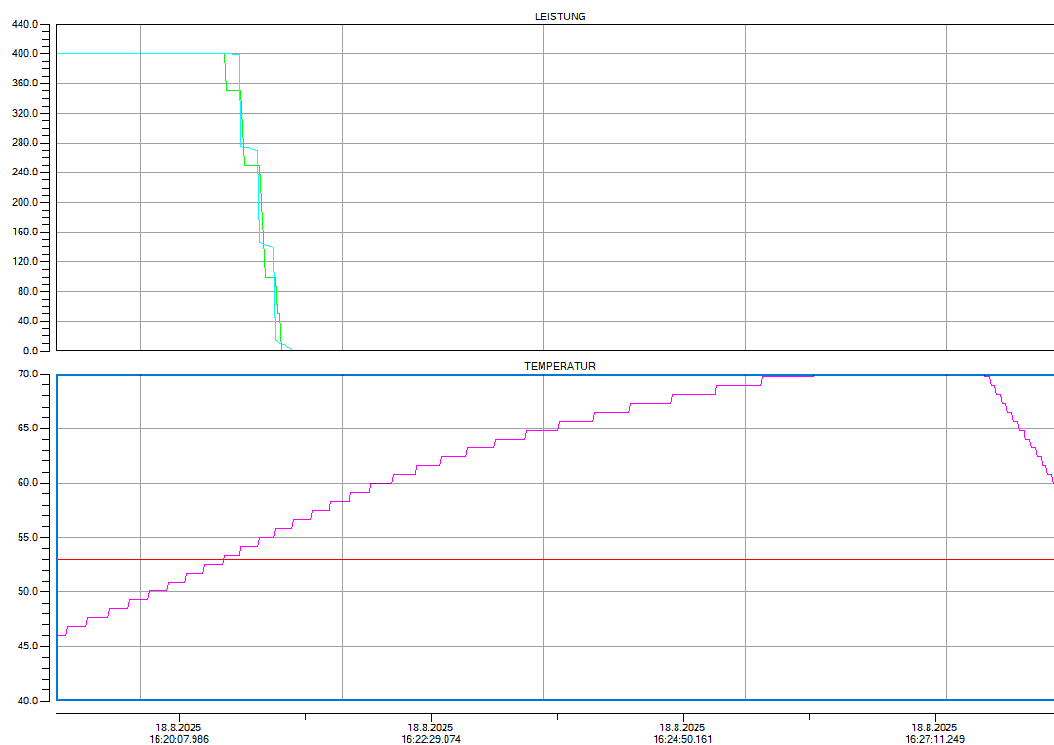
Die Schwingungen wurden deutlich reduziert. Gleichzeitig sank die maximale Austrittstemperatur um etwa 2 °C und liegt bei einer Heizstufe nun bei 51 °C. Diese Verbesserung wurde durch die Implementierung eines D-Reglers erreicht. Der Regler erkennt Steigungen und Senkungen der Temperatur, berechnet daraus einen gleitenden Durchschnittswert und passt die Stellgrösse des Mischventils entsprechend an. So werden je nach Trend grössere oder kleinere Stellbefehle ausgelöst. Damit steht eine belastbare Ausgangsbasis zur Verfügung, die sich in der Praxis bewährt hat.

5.4.3 Begrenzungsregler

Für den Fall, dass das Mischventil in vollständig geschlossener Stellung defekt ist, wurde ein Begrenzungsregler implementiert, der die Leistung reduziert. Dieser arbeitet ähnlich wie ein PI-Regler, wobei P- und I-Anteil als Parameter einstellbar sind. Ziel der Auslegung ist ein eher grobes, früh eingreifendes Verhalten, sodass Leistungsstufen rechtzeitig reduziert oder abgeschaltet werden. Dadurch bleibt der Temperaturanstieg begrenzt und das Risiko einer Alarmierung bei 75 °C wird deutlich verringert.

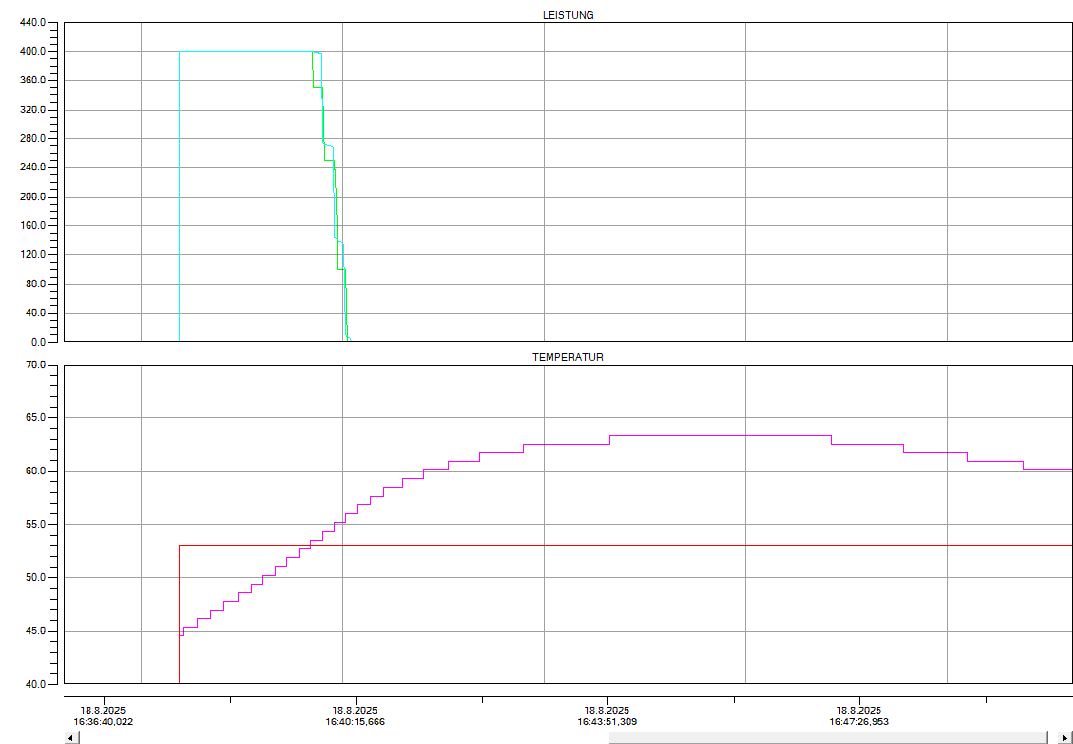
Die Wirkung des Begrenzungsreglers wird in zwei Abbildungen dargestellt. In der oberen Spalte ist die Leistung des Elektrodurchlauferhitzers zusammen mit der jeweils zulässigen Maximalleistung des Begrenzers gezeigt. In der unteren Spalte ist der Temperaturverlauf ersichtlich. Unter den Grafiken befindet sich eine Tabelle mit den zugehörigen Parametern und Messwerten als Legende.

Durch die Kombination aus proportionalem und integriertem Anteil kann der Regler sowohl schnelle Abweichungen erfassen als auch länger anhaltende Überschreitungen abbauen.



Variable	Instanzpfad	Selektiert 1	Selektiert 2	Zuletzt	Min	Max	Durchschnitt
I_AS;DURCHLEHR_AUSTRITTEMP				58,2564086914063	45,9487152099609	71,3846130371094	62,3663930772226
V_RG;DURCHLEHR_LEISTUNG				0	0	400	79,6564195298373
DURCHLEHR_BEG_MAX	TI_V_RG			-0,100000001490116	-0,100000001490116	400,100006103516	80,3540979191176
P;DURCHLEHR_AUSTRITTEMP H				53	53	53	53

Abbildung 59: Elektrodurchlauferhitzer, Begrenzungsregler, Versuch 1, Mischventil defekt



Variable	Instanzpfad	Selektiert 1	Selektiert 2	Zuletzt	Min	Max	Durchschnitt
I_AS;DURCHLERH_AUSTRITTEMP				60,1025695800781	44,5128173828125	63,3846130371094	59,541679738838
V_RG;DURCHLERH_LEISTUNG				0	0	400	68,8918558077437
DURCHLERH_BEG_MAX	TI_V_RG			-0,100000001490116	-0,100000001490116	400,100006103516	69,3516788485949
P;DURCHLERH_AUSTRITTEMP H				53	53	53	53

Abbildung 60: Elektrodurchlauferhitzer, Begrenzungsregler, Versuch 2, Mischventil defekt

Die maximale Temperatur wurde mit dem Versuch um 8 °C reduziert und bei aktivierter maximaler Stufe auf 63 °C begrenzt. Damit ist der Worst Case zuverlässig abgedeckt.

5.4.4 Mischventil Heizgruppe Betriebsgebäude

Das Mischventil des Betriebsgebäudes wurde nach einem ähnlichen Vorgehen wie das Mischventil des Elektrodurchlauferhitzers eingestellt, jedoch mit angepassten Parametern. Die Ergebnisse des Versuchs, dargestellt in der unteren Abbildung, zeigen ein gutes Regelverhalten. Daher wurde die Einstellung vorerst beibehalten.

Während der Probezeit im Winter ist es gut möglich, dass eine Feinabstimmung erforderlich wird, um die Regelung an die realen Betriebsbedingungen anzupassen. Für den ersten Stand erwiesen sich die gewählten Parameter jedoch als stimmig und praxistauglich.

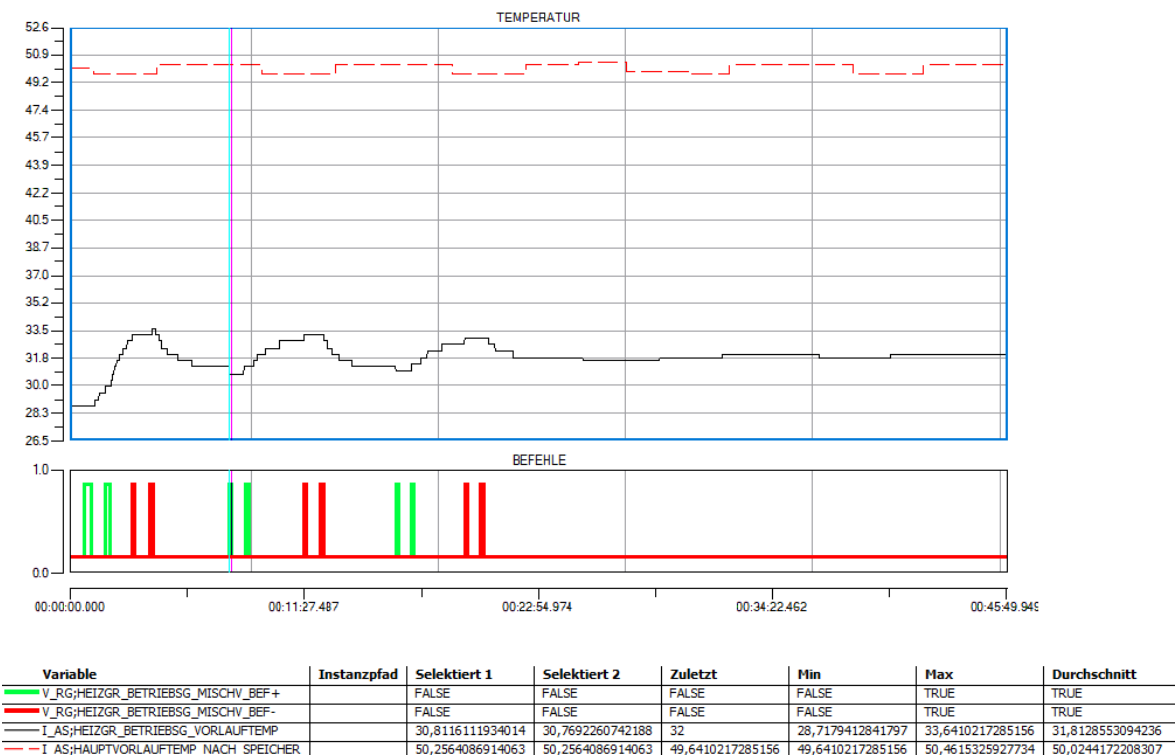


Abbildung 61: Heizgruppe Betriebsgebäude, Mischventil, Versuch 1, 22.08.2025

6 Pilot Umstellung auf Funktionales Engineering

Die bisherige Praxis der SPS-Programmierung nach CKW-Richtlinien zeigt, dass die aktuelle Arbeitsweise und Strukturierung in Teilen nicht optimal ist und zu unnötigen Umständlichkeiten führen kann. Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Pilot, inwiefern ein Funktional orientierter Ansatz Übersichtlichkeit, Wartbarkeit und Effizienz steigert und wie er sich gegenüber der bisherigen EVA-Struktur bewährt.

Da Funktionales Engineering im Team Engineering (NEPE) bereits ein zentrales Thema ist und ein grundlegender Wandel bei der Gestaltung der elektrischen Unterlagen bevorsteht, liegt eine Vereinheitlichung der Arbeitsprinzipien über Schema- und Softwareseite nahe. Konsistente Strukturen erleichtern die Abstimmung, verkürzen die Fehlersuche und fördern eine robuste Umsetzung.

Im Piloten werden drei Funktionale Kurzvarianten mittels der «SCAMPER» Kreativitätsmethode erarbeitet und anschliessend mit geeigneten Bewertungsinstrumenten verglichen: Präferenzmatrix, Nutzwertanalyse und Sensitivitätsanalyse. Auf dieser Basis wird die bevorzugte Variante ausgewählt und prototypisch umgesetzt.

Abschliessend erfolgt für die ausgearbeitete Variante eine SWOT-Analyse, welche Stärken und Chancen den Schwächen und Risiken gegenüberstellt und eine fundierte Entscheidung für das weitere Vorgehen ermöglicht.

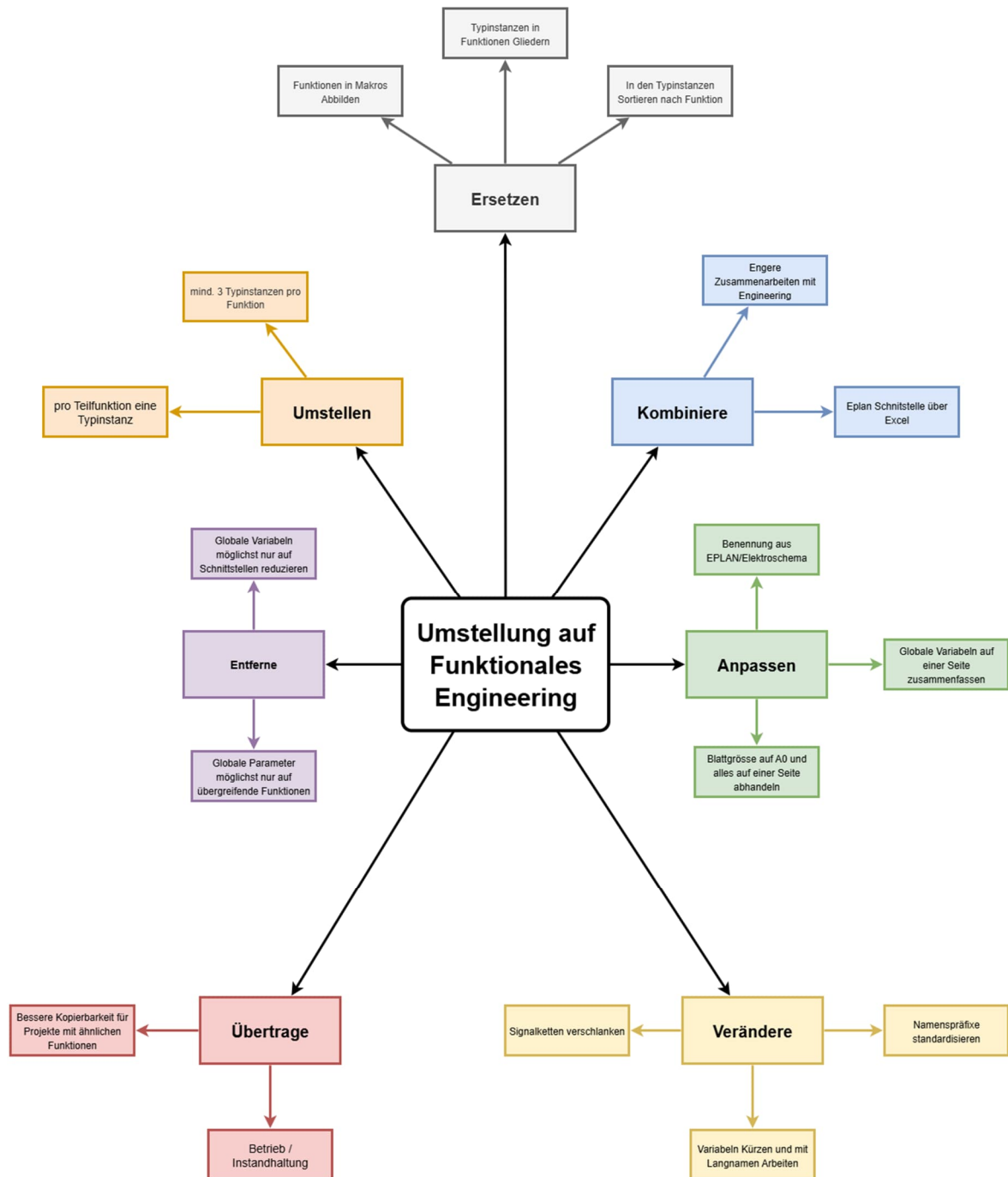


Diagramm 12: SCAMPER-Diagramm

6.1.1 Priorisierungsmethode «Eisenhower-Matrix»

Tabelle 2: Eisenhower-Matrix der Priorisierungsmethode

	Dringend	Nicht dringend
Wichtig	-Funktionen schlauer gliedern und sortieren. -Globale Variablen und Parameter nur wo nötig	-Bessere Kopierbarkeit erreichen. -Schnittstellen mit Engineering.
Nicht wichtig	-Betrieb und Instandhaltung erleichtern. -Variablen kürzen und Langnamen nutzen.	-Namenspräfixe Standardisieren. -Blattgrösse anpassen und mehr Informationen abbilden.

Aus der angewandten Kreativitätsmethode und der darauf basierenden Eisenhower-Matrix habe ich vier Prioritätsstufen abgeleitet, die die Umstellung strukturiert leiten.

Eine saubere Gliederung und Sortierung ist anspruchsvoll, muss aber nicht bei null beginnen: Bewährte Strukturen werden beibehalten und gezielt optimiert, um Komplexität zu reduzieren und Konsistenz zu erhöhen. Für die Übersicht gilt „weniger ist mehr“: Globale Variablen und Parameter kommen nur dort zum Einsatz, wo sie zwingend erforderlich sind. Gleichzeitig sollen Kopierbarkeit, Wartbarkeit, Anpassbarkeit verbessert werden. Informationen, die im Engineering mit EPLAN automatisch erzeugt werden, sind über geeignete Schnittstellen konsequent weiterzuverwenden und konsistent zu halten.

6.2 Variantenbildung

Die drei Varianten wurden auf Basis der Kreativitätsmethode SCAMPER und der Priorisierung mittels Eisenhower-Matrix entwickelt. In den folgenden Unterkapiteln werden sie vorgestellt und jeweils mit einem aussagekräftigen Titel versehen, der den jeweiligen Schwerpunkt klar erkennen lässt.

6.2.1 Kurzbeschreibung Variante «Alle guten Dinge sind EVA»

Diese Variante nimmt das in der CKW etablierte EVA-Prinzip (Eingang–Verarbeitung–Ausgang) auf und überträgt es von der Projekt- auf die Funktionsebene. Anstatt das Gesamtprojekt streng nach EVA zu gliedern, wird jede einzelne Funktion (Wärmepumpe 1, Heizgruppen oder Übergeordnetes) als eigenes EVA-Triplet aufgebaut. Dadurch entstehen pro Funktion drei klar abgegrenzte Bereiche: ein Abschnitt zum Einlesen und Aufbereiten der Eingangssignale, ein Abschnitt zur eigentlichen Logik- und Regelverarbeitung und ein Abschnitt zur Ausgabe von Stellgrössen, Meldungen und Zuständen. Die Signale bleiben weiterhin Karten- bzw. quellenbezogen geordnet, sodass bestehende Arbeitsweisen nicht durchbrochen werden.

Der zentrale Nutzen liegt in schlanken, eindeutig definierten Schnittstellen zwischen den drei Abschnitten. Übergaben werden in kompakten, strukturierten Datentypen gebündelt (z. B. als Strukturen oder Words/DWords), was den Bedarf an globalen Variablen reduziert und die Kopier- sowie Wiederverwendbarkeit erhöht. Interne Variablen behalten eine klare Funktionszuordnung, wodurch Lesbarkeit und Fehlersuche verbessert werden. Gleichzeitig bleiben CKW-Richtlinien, Benennungen und das gewohnte Engineering-Vorgehen weitgehend unangetastet. Die Umstellung erfolgt primär durch konsequente Funktionskapselung innerhalb der EVA-Logik.

Praktisch erleichtert diese Herangehensweise die schrittweise Umsetzung, das Testen in klaren Funktionsgrenzen sowie die spätere Wartung. Bei Erweiterungen kann die Verarbeitung (V) beispielsweise angepasst werden, ohne die Ein- und Ausgabebereiche zu verändern, solange die Schnittstelle stabil bleibt. Für die Dokumentation entsteht eine konsistente Struktur: Kopf-/Fussbereiche je Funktion, nachvollziehbare Übergaben und eine eindeutige Trennung der Verantwortlichkeiten. Insgesamt kombiniert die Variante den hohen Wiedererkennungswert der etablierten EVA-Denkweise mit den Vorteilen modularer Funktionsbildung und bildet so einen risikoarmen, aber wirksamen Ansatz für mehr Übersichtlichkeit, Wartbarkeit und Effizienz.

6.2.2 Kurzbeschreibung Variante «Funktionen, die Funktionieren»

Diese Variante stellt die Funktionssicht konsequent in den Mittelpunkt und bildet reale Aggregate oder Funktionsgruppen vollständig in jeweils eigenen Typinstanzen ab. Beispiele sind «Elektrodurchlauferhitzer», «Wärmepumpe», «Übergeordneter Regler» oder «Heizgruppe». Jede Funktionsinstanz umfasst ihre gesamte Logik, von Verriegelungen und Alarmen über Betriebsarten und Grenzwertmanagement und vieles mehr. Schnittstellen zu Visualisierung und zu übergeordneten/benachbarten Modulen werden am Kopf und Fuss der Seiten geführt, während die interne Verarbeitung mit funktionsinternen, generischen Variablen arbeitet.

Der Ansatz reduziert Komplexität an zwei Stellen zugleich: Erstens müssen beim Kopieren einer Funktion hauptsächlich die Schnittstellenparameter angepasst werden; interne Bezeichnungen können innerhalb der Instanz eindeutig und kompakt gehalten werden. Zweitens lassen sich globale Variablen weitgehend auf funktionsübergreifende Signale beschränken, etwa für Freigaben, Prioritäten oder gemeinsame Betriebszustände. Die Granularität bleibt flexibel: Eng vernetzte Teilfunktionen können bewusst zusammengeführt werden, um Abhängigkeiten sichtbar zu machen und die Anzahl von Querverweisen zu begrenzen, lose gekoppelte Teilfunktionen können getrennt bleiben, um Verantwortlichkeiten klar zu halten.

Die Funktionsbildung orientiert sich, wo immer möglich, an der elektrotechnischen Struktur (EPLAN), sodass Funktionsgrenzen und Schnittstellen deckungsgleich dokumentiert und parametrisiert werden. In der Offline-Simulation bietet die gebündelte Darstellung pro Funktionsinstanz Vorteile: Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind unmittelbar ersichtlich, Sprungfunktionen führen innerhalb eines konsistenten Kontextes, und Prüfabläufe können gezielt pro Aggregat erstellt werden. Für den Betrieb entstehen klare Zustands- und Meldestrukturen je Funktion, die sich gut in Leitsysteme integrieren lassen. Insgesamt schafft die Variante ein hohes Mass an Nachvollziehbarkeit und unterstützt sowohl das initiale Engineering als auch die langfristige Wartung in komplexen Anlagen.

6.2.3 Kurzbeschreibung Variante «Alle für einen, Funktionen für alle»

Diese Variante bündelt alle Funktionen einer Anlage seitenweise innerhalb derselben Typinstanz: Jede Funktion belegt genau eine eigene Seite (z. B. A0) und die nächste Funktion beginnt auf der darauffolgenden Seite – ohne Wechsel der Typinstanz. Dadurch entsteht ein linearer, gut navigierbarer Seitenfluss, in dem pro Seite eine in sich geschlossene Funktion dargestellt ist.

Der Schlüssel zum Ordnungssystem sind Makros und ein funktionsplanähnliches Layout. Wiederkehrende Bausteinmuster (z. B. Regler, Verriegelungen, Alarmbehandlung, Betriebsartenlogik) werden als Makros kapselt und auf der Funktionsseite konsistent eingesetzt. Das Seitenlayout folgt festen Raster- und Portregeln: Schnittstellen nach oben/unten, interne Signalflüsse links nach rechts.

Ein weiterer Effekt ist die Reduktion von Variablen. Innerhalb der Seite können Signale verstärkt über „Verdrahtungslinien“ geführt werden; Hilfs- und Zwischenvariablen werden dadurch seltener benötigt. Globale Variablen beschränken sich auf funktionsübergreifende Schnittstellen; funktionsinterne Bezeichnungen erhalten ein konsistentes Präfix zur eindeutigen Zuordnung und Filterbarkeit. Kopieren und Skalieren wird vereinfacht: Um eine Funktion zu instanziierten, wird die komplette Seite dupliziert und nur die Schnittstellen parametrisiert, die Makrostruktur sorgt für Einheitlichkeit und verringert Fehlerquellen.

Die Vorteile liegen in der schnellen Einsehbarkeit, der reduzierten Navigationskomplexität und einer hohen Layout- und Benennungskonsistenz. Tests und Simulationen können seitenbasiert durchgeführt werden, Mess-, Alarm- und Historisierungspunkte sind eindeutig der jeweiligen Funktionsseite zugeordnet. Gleichzeitig zwingt der seitenweise Aufbau zu sauberen, stabilen Schnittstellen und verhindert, dass Logik unkontrolliert über mehrere Instanzen „zerfasert“. Insgesamt eignet sich diese Variante besonders, wenn Diagnosegeschwindigkeit, Wiederverwendbarkeit per Seitenkopie und ein klarer, funktionsplanähnlicher Aufbau im Vordergrund stehen und bei minimalen Wechseln zwischen Typinstanzen.

6.3 Evaluation der geeignetsten Variante

Ziel ist die systematische, vergleichbare Prüfung der drei Varianten und darauf basierend eine fundierte Entscheidungsfindung. Die Bewertungskriterien umfassen u. a. Umsetzbarkeit, erwartete Effektivität, Lesbarkeit/Übersicht, Test- und Simulationsfähigkeit, Konsistenz zu CKW-Standards und Kostenwirkung. Die Kriterien wurden begründet, operationalisiert und in die weiteren Bewertungsverfahren überführt.

6.3.1 Variantenbewertung Kriterien

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| • Umsetzbarkeit | • Test- und Simulationsfähigkeit |
| • Erwartete Effektivität | • Konsistenz zu CKW-Standards |
| • Wiederverwendbarkeit | • Dokumentierbarkeit |
| • Lesbarkeit/Übersicht | • Skalierbarkeit |
| • Änderungsfreundlichkeit | • Kostenwirkung |

6.3.1.1 Begründung

- Umsetzbarkeit

Praktische Realisierung mit vorhandenen Tools, Know-how und Richtlinien, ohne grundlegende Prozessänderungen oder Speziallösungen.

- Erwartete Effektivität

Beitrag zur Zielerreichung durch klare Struktur, weniger Fehler, schnellere Diagnose, höhere Wiederverwendung und stabile Schnittstellen; messbare Qualitäts- und Betriebsgewinne.

- Wiederverwendbarkeit

In welchem Umfang Module/Makros projekt- und funktionsübergreifend erneut eingesetzt und parametrisiert werden können.

- Lesbarkeit/Übersicht

Klarheit der Struktur für Dritte; geringe kognitive Belastung, eindeutige Zuordnung von Funktionen und Signalen.

- Änderungsfreundlichkeit

Aufwand für spätere Anpassungen von Anforderungen/Umfang bei minimalen Seiteneffekten und stabilen Schnittstellen.

- Test- und Simulationsfähigkeit

Eignung für Modultests, Simulation und automatisierte Prüfabläufe (FAT/SAT), inklusive klarer Abnahme- und Fehlersuchpfade.

- Konsistenz zu CKW-Standards

Konformität mit Richtlinien, Naming, EVA-Prinzipien und Bezug zu EPLAN/Elektroschema; geringe Abweichungen vom Standardvorgehen.

- Dokumentierbarkeit

Abbildbarkeit in Handbüchern, EPLAN-Auszügen und Softwaredokumentation; Nachvollziehbarkeit für Reviews und Audits.

- Skalierbarkeit

Einfaches Wachstum bei zusätzlichen Aggregaten oder erweitertem Funktionsumfang ohne überproportionalen Mehraufwand.

- Kostenwirkung

Einfluss auf Engineering-, Test- und Wartungskosten.

6.4 Präferenzmatrix

Tabelle 3: Präferenzmatrix der Varianten

	a	b	c	d	e	f	g	h	j	k	Anzahl
a		a	a	d	a	a	g	a	a	a	9
b			b	b	b	b	g	b	b	b	8
c				d	c	c	g	c	j	c	7
d					d	f	d	h	d	d	6
e						e	e	e	j	e	5
f							g	h	j	f	4
g								g	g	g	3
h									j	h	2
j										j	1
k											0
Nennungen	7	7	4	6	4	2	7	3	5	0	45
Rang	1	1	6	4	6	9	1	8	5	10	
Prozent	15.6%	15.6%	8.9%	13.3%	8.9%	4.4%	15.6%	6.7%	11.1%	0.0%	100.0%

a	Umsetzbarkeit
b	Erwartete Effektivität
c	Wiederverwendbarkeit
d	Lesbarkeit/Übersicht
e	Änderungsfreundlichkeit
f	Test- und Simulationsfähigkeit
g	Konsistenz zu CKW-Standards
h	Dokumentierbarkeit
j	Skalierbarkeit
k	Kostenwirkung

6.5 Nutzwertanalyse

Tabelle 4: Nutzwertanalyse der Varianten

Kriterien	Gewichtung	Variante 1 «Alle guten Dinge sind EVA»		Variante 2 «Funktionen, die Funktionieren»		Variante 3 «Alle für einen, Funktionen für alle»	
		TN	GTN	TN	GTN	TN	GTN
Umsetzbarkeit	15.6	3	46.7	3	46.7	2	31.1
Erwartete Effektivität	15.6	2	31.1	3	46.7	1	15.6
Wiederverwendbarkeit	8.9	2	17.8	3	26.7	1	8.9
Lesbarkeit/Übersicht	13.3	1	13.3	3	40.0	3	40.0
Änderungsfreundlichkeit	8.9	3	26.7	2	17.8	1	8.9
Test- und Simulationsfähigkeit	4.4	3	13.3	2	8.9	2	8.9
Konsistenz zu CKW-Standards	15.6	3	46.7	2	31.1	2	31.1
Dokumentierbarkeit	6.7	1	6.7	3	20.0	2	13.3
Skalierbarkeit	11.1	1	11.1	3	33.3	3	33.3
Kostenwirkung	0.0	1	0.0	3	0.0	3	0.0
Gesamtnutzung	100.0		213.4		271.1		191.1

6.6 Ergebnis aus Präferenzmatrix und Nutzwertanalyse

Die Präferenzmatrix priorisiert die Bewertungskriterien eindeutig: Umsetzbarkeit und erwartete Effektivität liegen an der Spitze, gefolgt von Lesbarkeit/Übersicht, Konsistenz zu CKW-Standards und Skalierbarkeit. Kriterien mit geringerem Einfluss sind Test- und Simulationsfähigkeit sowie Kostenwirkung. Diese Gewichtungen wurden in die Nutzwertanalyse übernommen und dienten als Basis für die quantitative Gegenüberstellung der Varianten. In der Auswertung erzielt Variante 2 «Funktionen, die funktionieren» den höchsten Gesamtnutzen und setzt sich klar vor Variante 1 «Alle guten Dinge sind EVA» und Variante 3 «Alle für einen, Funktionen für alle» ab. Ausschlaggebend sind die hohe strukturelle Klarheit, die ausgeprägte Wiederverwendbarkeit der Funktionsbausteine, die gute Änderungsfreundlichkeit sowie die stimmige Anbindung an bestehende CKW-Standards inklusive Naming und EPLAN-Bezug. Zudem überzeugt Variante 2 durch eine transparente Schnittstellengestaltung und eine starke Eignung für modulare Tests und schrittweise Inbetriebnahmen. Insgesamt ergibt sich eine konsistente, methodisch abgesicherte Bevorzugung von Variante 2 als Grundlage für die weitere Ausarbeitung.

6.7 Sensitivitätsanalyse

6.7.1 Präferenzmatrix Sens.

Tabelle 5: Präferenzmatrix der Varianten - Sensitivitätsanalyse

	a	b	c	d	e	f	g	h	j	k	Anzahl
a		a	a	a	a	a	g	a	a	a	9
b			b	b	b	b	b	b	b	b	8
c				d	e	c	g	c	j	c	7
d					d	d	d	h	d	d	6
e						e	e	e	j	k	5
f							g	h	j	f	4
g								g	j	g	3
h									j	h	2
j										k	1
k											0
Nennungen	8	8	3	6	4	1	5	3	5	2	45
Rang	1	1	7	3	6	10	4	7	4	9	
Prozent	17.8%	17.8%	6.7%	13.3%	8.9%	2.2%	11.1%	6.7%	11.1%	4.4%	100.0%

- a Umsetzbarkeit
- b Erwartete Effektivität
- c Wiederverwendbarkeit
- d Lesbarkeit/Übersicht
- e Änderungsfreundlichkeit
- f Test- und Simulationsfähigkeit
- g Konsistenz zu CKW-Standards
- h Dokumentierbarkeit
- j Skalierbarkeit
- k Kostenwirkung

6.7.2 Nutzwertanalyse Sens.

Tabelle 6: Nutzwertanalyse der Varianten - Sensitivitätsanalyse

Kriterien	Gewichtung	Variante 1 «Alle guten Dinge sind EVA»		Variante 2 «Funktionen, die Funktionieren»		Variante 3 «Alle für einen, Funktionen für alle»	
		TN	GTN	TN	GTN	TN	GTN
Umsetzbarkeit	17.8	3	53.4	3	53.4	2	35.6
Erwartete Effektivität	17.8	2	35.6	3	53.4	1	17.8
Wiederverwendbarkeit	6.7	2	13.3	3	20.0	1	6.7
Lesbarkeit/Übersicht	13.3	1	13.3	3	40.0	3	40.0
Änderungsfreundlichkeit	8.9	3	26.7	2	17.8	1	8.9
Test- und Simulationsfähigkeit	2.2	3	6.7	2	4.4	2	4.4
Konsistenz zu CKW-Standards	11.1	3	33.3	2	22.2	2	22.2
Dokumentierbarkeit	6.7	1	6.7	3	20.0	2	13.3
Skalierbarkeit	11.1	1	11.1	3	33.3	3	33.3
Kostenwirkung	4.4	1	4.4	3	13.3	3	13.3
Gesamtnutzung	100.0		204.5		277.8		195.5

6.7.3 Ergebnis aus Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse überprüft die Tragfähigkeit der Entscheidung, indem sie die Gewichtungen der Bewertungskriterien systematisch variiert. Auch bei realistischen Verschiebungen, wie etwa einer stärkeren Gewichtung von Konsistenz zu CKW-Standards, Lesbarkeit/Übersicht, Skalierbarkeit oder Änderungsfreundlichkeit, behauptet Variante 2 «Funktionen, die funktionieren» konstant den ersten Rang. Variante 1 «Alle guten Dinge sind EVA» bleibt eine stabile, evolutionäre Alternative, insbesondere dann, wenn die Nähe zu bestehenden Vorgehensweisen und ein geringes Umstellungsrisiko betont werden. Variante 3 «Alle für einen, Funktionen für alle» kann in Szenarien mit sehr hoher Priorität auf schnelle Navigation und Seitenkonsistenz punktuell aufholen, erreicht jedoch in Summe nicht den Gesamtnutzen der führenden Option. Insgesamt zeigt die Analyse eine hohe Entscheidungssicherheit: Die Präferenz für Variante 2 ist robust gegenüber plausiblen Gewichtungsänderungen, minimiert Umsetzungsrisiken und bietet zugleich die beste Aussicht auf Effektivität, Wartbarkeit und eine zügige, standardkonforme Implementierung.

6.8 Ausarbeitung der Variante «Funktionen, die funktionieren»

Im folgenden Kapitel wird die finale Variante «Funktionen, die funktionieren» überarbeitet und detailliert beschrieben. Zur Bewertung wurde eine SWOT-Analyse durchgeführt, um Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der ausgearbeiteten Variante systematisch zu identifizieren und gegenüberzustellen.

6.9 «Funktionen, die funktionieren» ausgearbeitet

6.9.1 Funktionsanalyse Wärmegruppe

Zu Beginn wurden die in der Wärmegruppe vorhandenen Funktionen analysiert, mit dem Ziel, eine konsistente und möglichst schlanke Funktionsmenge zu definieren, die alle relevanten Aufgaben abbildet. Als sinnvoll und projektagäquat wurden folgende Funktionen festgelegt:

- Übergeordnet
- Elektrodurchlauferhitzer
- Wärmepumpen übergeordnet
- Wärmepumpe 1
- Wärmepumpe 2
- Heizgruppe Wohnkolonie
- Heizgruppe Betriebsgebäude
- Heizgruppe Dachstock
- Heizgruppe Montageturm

Die beiden übergeordneten Funktionen wurden gewählt, um systemweite Aufgaben zentral zu bündeln. Dazu zählt insbesondere der übergeordnete Regler, der mehrere Typinstanzen betrifft und daher nicht sinnvoll einer einzelnen Teilfunktion (z. B. dem Elektrodurchlauferhitzer) zugeordnet werden kann. Gleiches gilt für die Plattentauscherpumpe, die beide Wärmepumpen betrifft und folglich ebenfalls übergeordnet verortet ist. Diese Struktur verhindert doppelte Logik, reduziert Schnittstellenabhängigkeiten und erhöht die Transparenz sowie Wartbarkeit der Gesamtlösung.

6.9.2 Layout

Die bisherige Layout-Praxis ordnete alle Seiten einer Typinstanz strikt in einer vertikalen Spalte an. Wie in der Abbildung ersichtlich, führt dieses „Seitenband“ bei wachsender Seitenzahl zu langen Scrollstrecken und erschwert die schnelle Navigation. Insbesondere wird die Übersichtsansicht von CAExPlus faktisch entwertet: Zusammenhänge sind kaum erkennbar, Quersprünge sind unkomfortabel, und das gezielte Auffinden thematisch zusammengehöriger Bereiche wird unnötig zeitaufwendig.

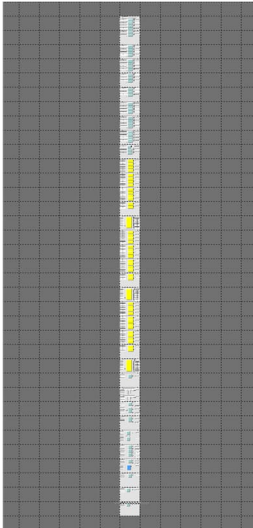


Abbildung 62: Übersichtsansicht von TI_I_AS

CAExPlus unterstützt grundsätzlich eine freie Seitenanordnung in alle vier Richtungen; Seiten lassen sich mit der Funktion „Seiten verschieben“ zuverlässig positionieren. Trotz des ausdrücklichen Abratens im Engineering-Manual traten in der Praxis keine Probleme auf: Das Verschieben funktionierte stabil, Referenzen blieben konsistent, und die Übersichtlichkeit nahm deutlich zu.

Daher wurde das Layout umgestellt: Anstatt eines linearen, vertikalen Strangs werden Seiten logisch in einem 2D-Raster gruppiert. Diese räumliche Gliederung nutzt die CAExPlus-Übersicht sinnvoll, verkürzt Navigationswege, macht Signalflüsse auf einen Blick erkennbar und verbessert die Wartbarkeit, ohne die CKW-Seitensystematik zu verlassen.

4.5.1. Allgemein

Beim Engineering der Typinstanzen sollte darauf geachtet werden, diese übersichtlich zu gestalten. Es sollte immer genügend Platz für Erweiterungen sein. Außerdem wird die Lesbarkeit dadurch erhöht.

Innerhalb einer Typinstanz wie auch in Functions und Functionblocks sollte ausschließlich eine Blattspalte verwendet werden um der Abarbeitungsreihenfolge von oben nach unten gerecht zu werden. Dadurch wird das Navigieren innerhalb eines Projekts erleichtert. Verwendet man mehrere Spalten, kann es sein, dass die Funktion "Seite verschieben" nicht korrekt ausgeführt wird.

Abbildung 63: Ausschnitt aus Engineering Manual CAExPlus

Das im Engineering-Manual empfohlene Layout hat einen klaren technischen Hintergrund. Grundsätzlich erfolgt die Abarbeitung der Bausteine nach IEC 61131-3. Wo die Norm Lücken lässt, greift die in FBS/AS von Siemens definierte Regel: Netzwerke werden von oben links nach unten rechts ausgewertet; „oben“ hat Vorrang vor „links“. CAExPlus wählt bei mehreren möglichen Netzwerken stets das am weitesten oben/links liegende Netzwerk, wie der Ausschnitt aus dem CAExPlus-Handbuch zeigt:

Bei Fällen, die von der IEC 61131-3 nicht geregelt werden, bestimmt CAEx plus das auszuwertende Netzwerk nach der grafischen Position der Netzwerke zueinander:

- Mehr als ein Netzwerk ist abarbeitbar:
CAEx plus wählt das am weitesten oben/links stehende Netzwerk unter den abarbeitbaren Netzwerken.
- Kein Netzwerk ist abarbeitbar:
CAEx plus wählt das am weitesten oben/links stehende Netzwerk aller noch nicht abgearbeiteten Netzwerke.

Die Regel der grafischen Position in FBS/AS (von Siemens AG festgelegt) besagt also:
Netzwerke werden von "oben links nach unten rechts" gereiht, "oben" gilt vor "links". Die Position eines

Abbildung 64: Ausschnitt aus dem Handbuch von CAExPlus (F11)

Vor diesem Hintergrund habe ich eine Layout-Variante entwickelt, die zwei Ziele vereint: erstens die Einhaltung der Abarbeitungsreihenfolge, zweitens eine deutlich verbesserte Übersichtsansicht. Die „Mini-Variante“ eignet sich besonders für kleine oder nicht zeitkritische Funktionen. Sie ordnet die Seiten im Sinn des EVA-Prinzips in einem kompakten 2D-Raster an: oben die Eingänge, mittig die Verarbeitung und unten die Ausgänge. Dadurch bleibt die Abarbeitung eindeutig deterministisch, Navigationswege werden kürzer, und thematisch zusammengehörige Netzwerke sind auf einen Blick auffindbar.

Tabelle 7: Layout Variante Mini

E	Eingänge von I/O Karten Binär	Eingänge von I/O Karten Analog	Eingänge von Visualisierung	Eingänge von anderen TI	usw.
V	Grenzwertbildung	Aggregatsteuerung	Auswahl	usw.	usw.
A	Ausgänge zu I/O Karten Binär	Ausgänge zu I/O Karten Analog	Ausgänge zur Visualisierung	Ausgänge zu anderen TI	usw.

Bei der Heizgruppe Wohnkolonie wurde das Layout auf das kompakte Mini-Variante umgestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die umgestaltete Heizgruppe Wohnkolonie mit der neuen Seitenanordnung:

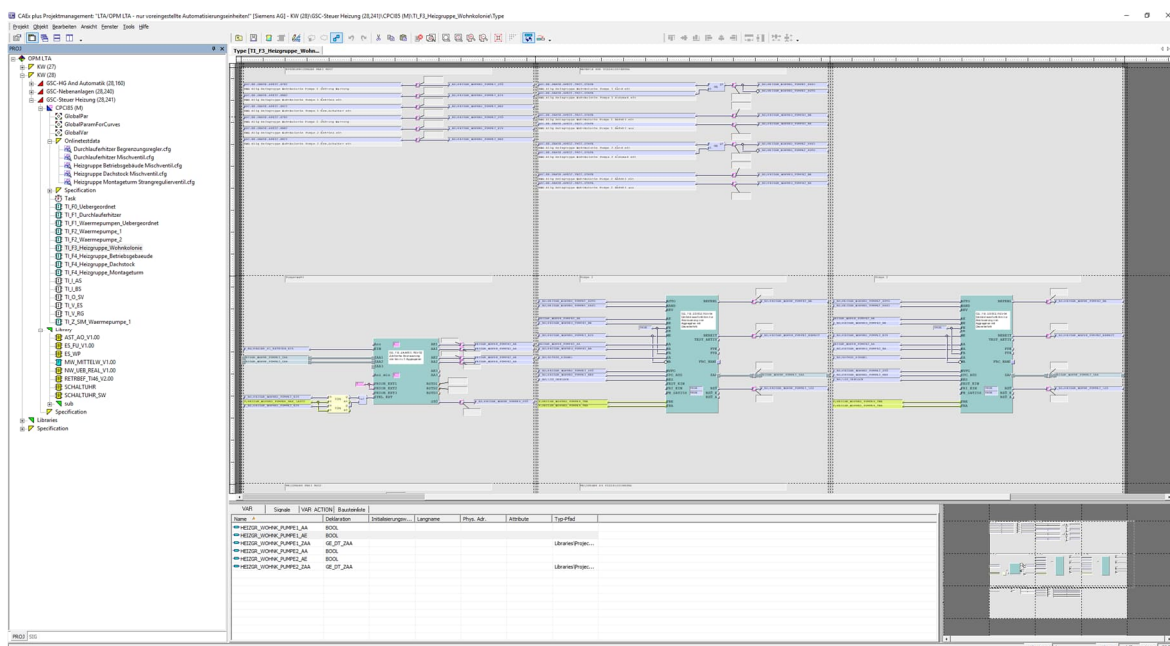


Abbildung 65: Typinstanz Heizgruppe Wohnkolonie Funktional mit neuem Layout Mini

Bei grösseren Funktionen, etwa der übergeordneten Typinstanz, ist die Mini-Variante ungeeignet. Dafür wurde eine flexible Maxi-Variante entwickelt. Sie verbessert die Übersicht bei vielen Seiten, indem die EVA-Bereiche entlang der Abarbeitungsreihenfolge strukturiert werden. Für Ein- und Ausgänge ist dies weniger relevant; hier dient die Maxi-Variante vor allem der kompakteren, logischeren Seitengliederung.

In der Verarbeitung ist die Platzierung entscheidend, da CAExPlus die oberen Seiten zuerst abarbeitet. Grundregeln:

- Unabhängige Seiten dürfen horizontal nebeneinander liegen (z. B. Regler 1 und Regler 2 ohne gegenseitige Abhängigkeit).
- Abhängigkeiten müssen strikt vertikal nach Abarbeitungsreihenfolge angeordnet werden (z. B. Zusatzregler unter dem Hauptregler).
- Die horizontale Position ist bei abhängigen Ketten zweitrangig; massgeblich ist die vertikale Reihenfolge.

Eine beispielhafte Anordnung wird in der folgenden Tabelle veranschaulicht:

Tabelle 8: Layout Variante Maxi

E 1	Eingänge von I/O Karten Binär	Eingänge von I/O Karten Binär	Eingänge von I/O Karten Binär	Eingänge von I/O Karten Binär	Eingänge von I/O Karten Binär
E 2	Eingänge von I/O Karten Analog	Eingänge von I/O Karten Analog	Eingänge von Visualisierung	Eingänge von Visualisierung	Eingänge von anderen TI
V 1	Grenzwertbildung	Grenzwertbildung	Grenzwertbildung		
V 2	Regler 1	Regler 2			
V 3	Zusatz Regler für Regler 1				
V 4	Auswahl	Auswahl			
V 5	Aggregatsteuerung	Aggregatsteuerung	Aggregatsteuerung		
A 1	Ausgänge zu I/O Karten Binär	Ausgänge zu I/O Karten Binär	Ausgänge zu I/O Karten Binär	Ausgänge zu I/O Karten Analog	Ausgänge zu I/O Karten Analog
A 2	Ausgänge zur Visualisierung	Ausgänge zur Visualisierung	Ausgänge zu anderen TI	Ausgänge zu anderen TI	Ausgänge zu anderen TI

Bei der übergeordneten Typinstanz wurde das Layout auf die flexible Maxi-Variante umgestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Umgestaltung mit der neuen Seitenanordnung:

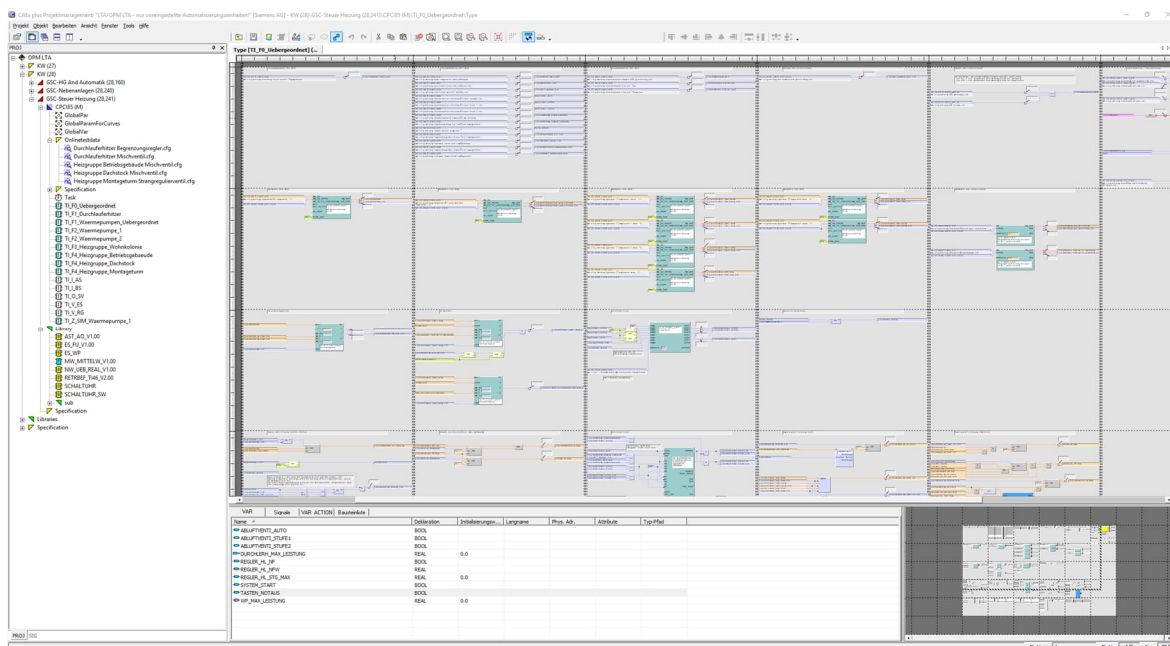


Abbildung 66: Typinstanz überordnet mit neuem Layout Maxi

6.9.3 Abarbeitungsreihenfolge

Die Abarbeitungsreihenfolge der Typinstanzen wurde prioritätsbasiert festgelegt: zentrale Funktionen erhalten eine hohe Priorität (10), weniger kritische eine niedrigere (100). Dieses Vorgehen orientiert sich an der CKW-Richtlinie, verzichtet jedoch auf eine starre, vordefinierte Reihenfolge der Typinstanzen. Die funktionale Reihenfolge wird somit projektspezifisch und nach technischem Ermessen definiert, sodass sicherheits- und betriebsrelevante Funktionen zuerst ausgeführt werden und nachgelagerte Aufgaben entsprechend nachgeordnet sind.

Tabelle 9: Abarbeitungsreihenfolge der CKW-Richtlinie

Reihenfolge	Instanzname
10	Tl#_I_AS
20	Tl#_I_BS
30	Tl#_V_SZ
40	Tl#_V_RG
50	Tl#_V_FK
60	Tl#_V_TR
70	Tl#_V_PG
80	Tl#_V_ES
90	Tl#_O_SV

6.9.4 Bezeichnung der verschiedenen Variablen

Wie bereits erwähnt, übernimmt die CKW-Richtlinie bewährte Standards für Benennungen sowie den Umgang mit globalen und lokalen Variablen und Parametern (global/intern); diese bleiben unverändert. Durch den funktionalen Aufbau sinkt jedoch die Anzahl globaler Variablen und Parameter deutlich. Die verbleibenden dienen primär als Schnittstellen zwischen Typinstanzen, sind am oberen bzw. unteren Rand der Typinstanz platziert und bilden den Übergang zwischen globalen und internen Signalen. Wichtig: Interne Variablennamen dürfen keinen Typinstanznamen enthalten, sondern müssen generisch sein. So bleiben sie beim Kopieren unverändert und sind unabhängig vom Instanzkontext, beispielsweise spielt es keine Rolle, ob die Variable in Wärmepumpe 1 oder Wärmepumpe 2 verwendet wird.

6.10 SWOT-Analyse

Tabelle 10: SWOT-Analyse der ausgewählten Variante

Stärken: -Hohe Kopierbarkeit bei ähnlichen Funktionen -Einheitliche EVA-Logik erhöht Lesbarkeit und beschleunigt das Onboarding -Generische Variablennamen verbessern die Wiederverwendbarkeit -Aufgeräumte globale Variablen und Parameter (nur übergreifende) - Klare Platzierung der Schnittstellen oben/unten erleichtert die Integration -Abhängigkeiten werden schneller erkennbar	Schwächen: -Der Begriff „Funktion“ bietet Interpretationsspielraum und erfordert klare Definitionen -Simulationen sind nur Signalbasiert möglich; ein gezieltes „Zwischenpositionieren“ in der Abarbeitungsreihenfolge zwischen Eingängen und Verarbeitung entfällt
Chancen: -Offlinetests können ganze Funktionen inklusive Schnittstellen abdecken -Simulationen umfassen nur die tatsächlich benötigten Typinstanzen -Schnellere Inbetriebnahme durch priorisierte Teilfunktionen und saubere Schnittstellen -Gute Skalierbarkeit durch einfache Erweiterung der Struktur -Simulationen nutzen ausschliesslich „effektive“ Ein- und Ausgänge -Beschleunigtes Steuerungsengineering	Risiken: -Für zeitkritische Steuerungen ist die Variante noch nicht validiert -Nur ähnliche Steuerungen lassen sich identisch/ähnlich wiederverwenden; abweichende Funktionen erfordern Anpassungen -Mischbetrieb alter und neuer Struktur birgt Übergangsrisiken

6.10.1 Entscheid mit sachlogischer Begründung

Aufgrund der Tatsache, dass die Variante deutlich mehr Stärken und Chancen mit höherer Gewichtung aufweist als Risiken und Schwächen, gilt die Umsetzung als gut realisierbar. Die identifizierten Risiken sollten gezielt gemanagt werden, um eine reibungslose Einführung sicherzustellen. Die klare Benennung der Schwächen ermöglicht eine frühzeitige Vorbereitung und reduziert potenzielle Auswirkungen.

Kurzbegründung: Die funktionsorientierte EVA-Struktur mit klaren Schnittstellen, prioritätsbasierter Abarbeitung und konsistenten Benennungsregeln erhöht Kopierbarkeit, Übersicht und Wartbarkeit. Sie unterstützt schnellere Tests und Inbetriebnahmen und skaliert sinnvoll auf zusätzliche Funktionen. Offene Punkte betreffen vor allem zeitkritische Anwendungen und den Übergang von bestehenden Strukturen. Insgesamt überwiegt der Nutzen bei vertretbarem Risiko.

7 Projektabschluss

Der Projektabschluss ist der letzte Schritt eines Projekts und beinhaltet die Überprüfung, Dokumentation und Bewertung, um sicherzustellen, dass die Projektziele erreicht wurden. Er umfasst auch die archivierte Aufbewahrung von Projektdokumenten sowie die Erstellung von Abschlussberichten. Der Projektabschluss dient dazu, Erfahrungen zu reflektieren, Lehren zu ziehen und den Projektfortschritt zu bewerten.

7.1 Projektüberwachung

Die Projektüberwachung ist ein entscheidender Schritt in der erfolgreichen Durchführung eines Projekts. Sie ermöglicht es, den Fortschritt, die Ressourcen und die Leistung des Projekts zu verfolgen und sicherzustellen, dass es auf Kurs bleibt. Abweichungen können dadurch frühzeitig erkannt und durch eine detaillierte Analyse begründet werden.



7.1.2 Fazit Ablaufplanung

Insgesamt stimmte die geplante Ablaufplanung gut mit den tatsächlich ausgeführten Terminen überein. Mehrere Arbeitspakete wurden früher als vorgesehen abgeschlossen, sodass die Inbetriebnahme des Elektrodurchlauferhitzers um eine Woche vorgezogen werden konnte. Verzögerungen externer Parteien führten hingegen zu einer späteren Inbetriebnahme der Wärmepumpen; entsprechend wurden andere Heizgruppen priorisiert. Die Simulation wurde zeitlich nach hinten verschoben; ihr Umfang wurde in der Projektphase präzisiert und konkretisiert. Sehr gut geplant war die Phase „Optimierung und Fertigstellung“: Sie verlief exakt nach Plan und markierte das Ende der Realisierungsphase.

Die Onlinepublikation wird seitens TEKO zwei Wochen vor der ordentlichen Präsentation veröffentlicht. Diese Information wurde erst während des Projekts bekannt, weshalb der Termin im Plan rot markiert ist. Alle Meilensteine wurden erreicht, überwiegend pünktlich oder vorzeitig, mit Ausnahme der Onlinepublikation und einer Verzögerung bei der Simulation.

7.2 Zeitaufwand

Während der Diplomarbeit wurde ein Arbeitsjournal geführt, um die Tätigkeiten zu protokollieren. Dadurch sollte klar nachvollzogen werden, wofür die Stunden investiert wurden. Zudem sollte der Anteil der tatsächlich geleisteten Arbeitsstunden mit den offerierten Stunden verglichen werden, wie im Kapitel Budget beschrieben. In der Tabelle wurden Datum, Zeit, Tätigkeit, Kategorie und Bemerkungen erfasst. Die Stunden inklusive Pausen wurden automatisch berechnet. Auf dieser Grundlage konnten dank Pivot-Funktionen in Excel aussagekräftige und anschauliche Diagramme erstellt werden, die informativer sind als die reine Tabelle. Dies ist in den nachfolgenden Diagrammen zu sehen.

Datum	Tageszeit	Beginn	Pause	Ende	Std. / Zeit	Tätigkeit	Kategorie	Details	Bemerkung
Dienstag, 17. Juni 2025	Vormittag	8.00 Uhr		10.00 Uhr	2.00 h	Kickoff	Projektkoordination	Einführung	Siehe Onenote CKW
Dienstag, 24. Juni 2025	Vormittag	8.00 Uhr		10.00 Uhr	2.00 h	Vorort Besuch	Projektkoordination	Einführung	Mit Stefan Bächler
Mittwoch, 2. Juli 2025	Vormittag	8.00 Uhr		12.00 Uhr	4.00 h	Einführung Basics SPS Software	Projektkoordination	Einführung	Mit Ulrich Peter
Montag, 28. Juli 2025	Vormittag	11.00 Uhr		12.15 Uhr	1.15 h	Ordnungsstruktur erstellen	Projektkoordination	Initialisierung	
Montag, 28. Juli 2025	Nachmittag	13.00 Uhr		15.00 Uhr	2.00 h	Einführung Basics SPS Software	Softwareengineering	I_BS	Mit Ulrich Peter und danach Stefan Bächler
Montag, 28. Juli 2025	Abend	20.00 Uhr		22.30 Uhr	2.30 h	Doku	Diplomarbeit	Initialisierung	(Netzplan, Zielscheibe, Doku, usw.)
Dienstag, 29. Juli 2025	Vormittag	8.00 Uhr	0.45 h	12.00 Uhr	3.15 h	Globale Variablen definieren von den Eingängen	Softwareengineering	I_BS	
Dienstag, 29. Juli 2025	Nachmittag	12.30 Uhr	0.30 h	17.30 Uhr	4.30 h	Globale Variablen definieren von den Eingängen	Softwareengineering	I_BS	
Mittwoch, 30. Juli 2025	Vormittag	8.00 Uhr	0.30 h	11.30 Uhr	3.00 h	Globale Variablen definieren von den Eingängen	Softwareengineering	I_BS	
Mittwoch, 30. Juli 2025	Nachmittag	12.30 Uhr	0.30 h	17.00 Uhr	4.00 h	Globale Variablen definieren von den Ausgängen	Softwareengineering	I_AS	
Donnerstag, 31. Juli 2025	Vormittag	8.00 Uhr		9.00 Uhr	1.00 h	Globale Variablen definieren von den Ausgängen	Softwareengineering	I_AS	
Donnerstag, 31. Juli 2025	Nachmittag	14.00 Uhr	0.15 h	17.00 Uhr	2.45 h	Fragen Klären	Softwareengineering	Makro	Makro in Makro, Weitere Anweisungen
Samstag, 2. August 2025	Nachmittag	15.00 Uhr	0.30 h	18.30 Uhr	3.00 h	Doku	Diplomarbeit	Planung	(Projektvertrag / Zielscheibe/Beruflicher Lebenslauf)
Montag, 4. August 2025	Vormittag	9.30 Uhr	0.30 h	11.30 Uhr	2.00 h	Zeitmakro	Diplomarbeit	Planung	(Projektstrukturplan)
Montag, 4. August 2025	Nachmittag	13.00 Uhr		14.00 Uhr	1.00 h	Zeitmakro	Softwareengineering	Makro	
Montag, 4. August 2025	Nachmittag	14.00 Uhr	0.30 h	18.00 Uhr	3.30 h	Durchlauferhitzer	Softwareengineering	V_RG	
Montag, 4. August 2025	Abend	21.00 Uhr		22.00 Uhr	1.00 h	Doku	Diplomarbeit	Initialisierung	(Auftragklärung)
Dienstag, 5. August 2025	Vormittag	7.00 Uhr	0.30 h	10.00 Uhr	2.30 h	Durchlauferhitzer	Softwareengineering	V_RG	
Dienstag, 5. August 2025	Nachmittag	15.30 Uhr		19.15 Uhr	3.45 h	Durchlauferhitzer	Softwareengineering	V_RG	
Mittwoch, 6. August 2025	Vormittag	7.30 Uhr	0.30 h	10.30 Uhr	2.30 h	Durchlauferhitzer	Softwareengineering	V_RG	
Mittwoch, 6. August 2025	Vormittag	10.30 Uhr		11.30 Uhr	1.00 h	Globale Variablen definieren von den Ausgängen	Softwareengineering	O_SV	
Mittwoch, 6. August 2025	Nachmittag	12.15 Uhr		14.00 Uhr	1.45 h	Wohnkolonie	Softwareengineering	V_ES	
Mittwoch, 6. August 2025	Nachmittag	14.00 Uhr	0.15 h	17.30 Uhr	3.15 h	Erste Kompilierbare Version	Softwareengineering	O_SV	Inkl. Aufräumen und fehlerbehebung
Mittwoch, 6. August 2025	Abend	21.00 Uhr		23.30 Uhr	2.30 h	Doku	Diplomarbeit	Planung	(Gantt / Projektstrukturplan)
Donnerstag, 7. August 2025	Vormittag	8.15 Uhr	2.30 h	11.30 Uhr	0.45 h	Doku	Diplomarbeit	Initialisierung	
Freitag, 8. August 2025	Vormittag	8.00 Uhr	0.30 h	11.45 Uhr	3.15 h	Globale Variablen definieren von den Ausgängen	Softwareengineering	I_AS	
Freitag, 8. August 2025	Nachmittag	12.30 Uhr	0.15 h	17.30 Uhr	4.45 h	Simulation	Softwareengineering	SM	
Sonntag, 10. August 2025	Nachmittag	13.45 Uhr		17.00 Uhr	3.15 h	Doku	Diplomarbeit	Initialisierung	
Montag, 11. August 2025	Vormittag	7.30 Uhr	0.30 h	11.45 Uhr	3.45 h	Wärmepumpe 1	Softwareengineering	V_ES	

Abbildung 68: Ausschnitt aus dem Arbeitsjournal

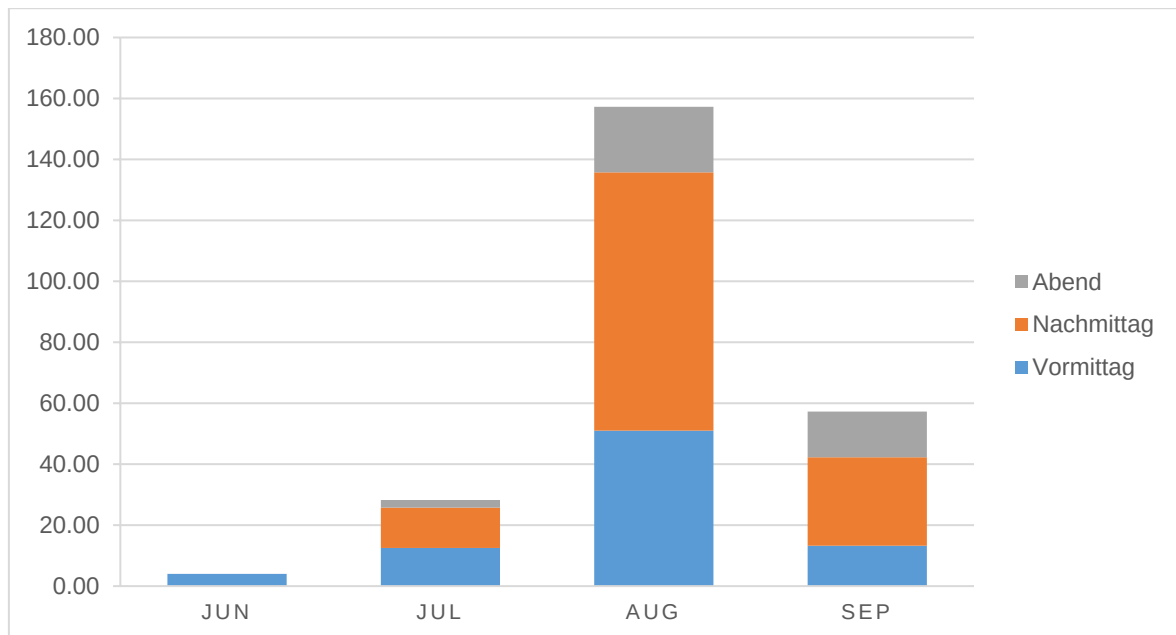


Diagramm 14: Säulendiagramm mit Aufwand nach Monat und Tageszeitunterteilung

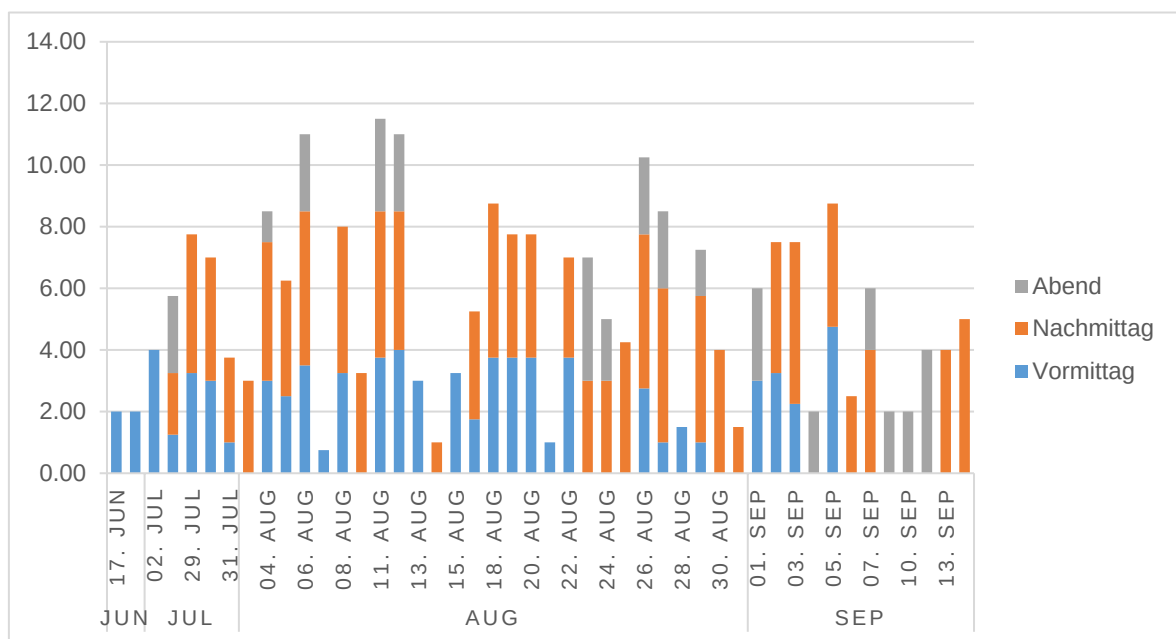


Diagramm 15: Säulendiagramm mit Aufwand nach Tag und Tageszeitunterteilung

Die Diagramme zeigen, dass die Arbeitsbelastung im August und Anfang September deutlich anstieg. Ein grosser Anteil der Stunden entfiel auf Nachmittage und Abende. Zudem sind vermehrt längere Einsätze an Wochenenden erkennbar, die vor allem durch die Dokumentation verursacht wurden. Dadurch erklären sich die hohen Gesamtstunden in dieser Phase.

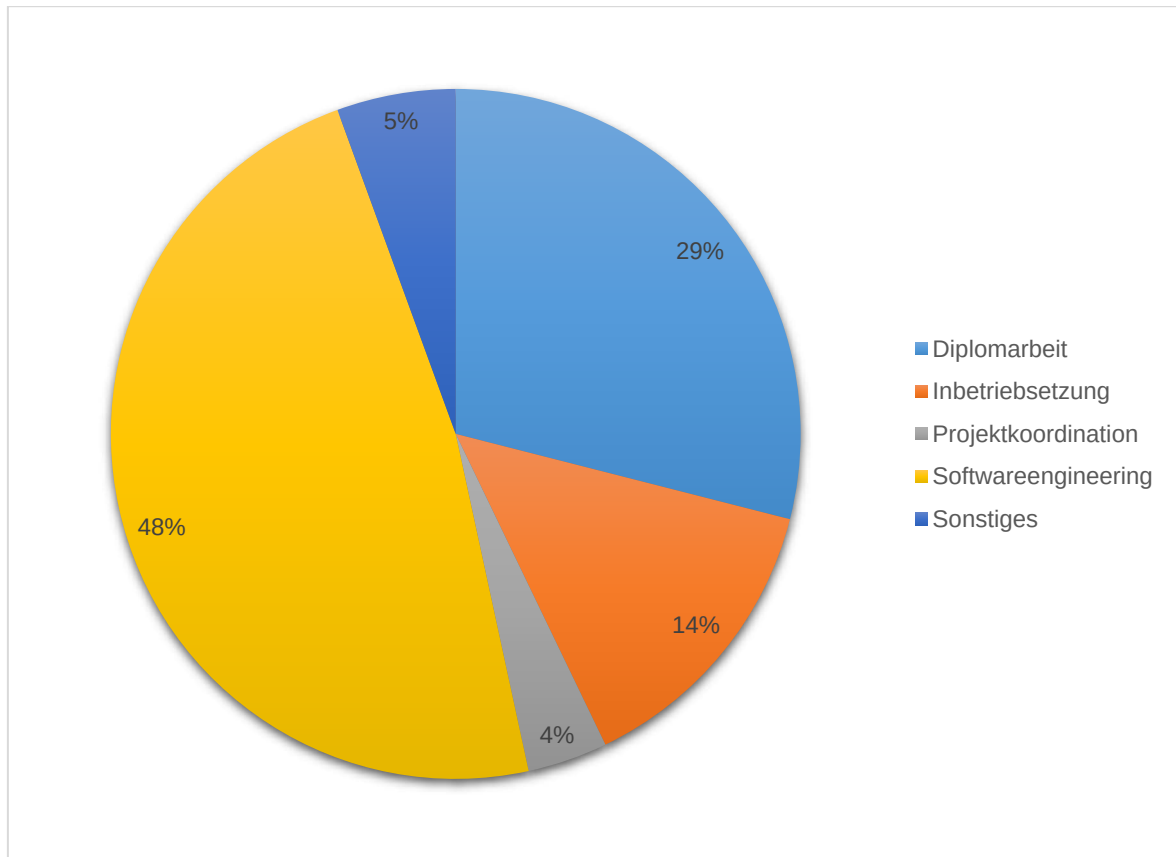


Diagramm 16: Kreisdiagramm nach Kategorie

Die Verteilung der Arbeitsstunden zeigt einen deutlichen Schwerpunkt im Softwareengineering mit 48 Prozent. Dieser Anteil umfasst die Entwicklung der SPS-Logik, Offline-Tests, Simulationen und daraus abgeleitete Anpassungen. Die Diplomarbeit selbst macht 29 Prozent aus und beinhaltet die vollständige Dokumentation. Für die Inbetriebsetzung wurden 14 Prozent aufgewendet, insbesondere für Vor-Ort-Tests. Die Projektkoordination liegt bei 4 Prozent, Sonstiges bei 5 Prozent.

Tabelle 11: Pivot Tabelle der Summen Stunden nach Kategorie und Tätigkeit

Kategorie	Tätigkeit	Summe von Std. [Zahl]
[-] Diplomarbeit		71.50
	Doku	71.50
[-] Inbetriebsetzung		34.25
	Betriebsgebäude & Dachstock	3.75
	Durchlauferhitzer	9.00
	Montageturm / Abluftventilator	5.00
	Peripherie Wärmepumpe	4.00
	Pumpe Plattentaucher	3.75
	WP2 und Kombination WP1 & WP2	8.75
[-] Projektkoordination		9.25
	Einführung Basic's SPS Software	4.00
	Kickoff	2.00
	Ordnerstruktur erstellen	1.25
	Vorort Besuch	2.00
[-] Softwareengineering		118.00
	Aufkopieren Wärmepumpe 2	2.00
	Doku CKW	6.25
	Durchlauferhitzer	12.25
	Einführung Basic's SPS Software	2.00
	Erste Kompilierbare Version	3.25
	Fragen Klären	2.75
	Globale Variablen definieren von den Ausgängen	9.25
	Globale Variablen definieren von den Eingängen	10.75
	Mischventile Heizgruppen	3.75
	Montageturm	5.25
	Simulation	25.00
	Wärmepumpe 1	30.75
	Wohnkolonie	1.75
	Zeitmakro	3.00
[-] Sonstiges		13.75
	Besichtigung Betreuer Andreas Holzer	2.75
	Probleme mit PC	1.00
	Umstellung auf Funktional	10.00
Gesamtergebnis		246.75

Die Pivot Tabelle mit den Details bestätigt die Verteilung aus dem Kreisdiagramm. Insgesamt wurden 246.75 Stunden erfasst, davon 118 Stunden für Softwareengineering mit Schwerpunkten auf Simulation, Wärmepumpe 1 und globale Variablen. Für die Diplomarbeit wurden 71.5 Stunden für die Dokumentation eingesetzt. Die Inbetriebsetzung umfasst 34.25 Stunden für Vor-Ort-Tests am Elektrodurchlauferhitzer, an der Peripherie sowie an den Kombinationen WP1/WP2. Für die Projektkoordination wurden 9.25 Stunden verwendet, für Sonstiges 13.75 Stunden.

7.2.1 Fazit Zeitaufwand

Tabelle 12: Gegenüberstellung Offerte und geleistete Stunden

Offertenbeschreibung	Stunden in Offerte	Stunden geleistet	Stunden Differenz	Differenz in %
Projektkoordination	40	9.25	30.75	23.13%
Hardware- und Softwareengineering	200	118	82	59.00%
Inbetriebsetzung	50	34.25	15.75	68.50%
Ergebnis	290	161.5	128.5	56%

Aus der Tabelle geht hervor, dass über alle drei Positionen erst 56% der offerierten Stunden eingesetzt wurden. Damit stehen noch 44% bzw. 128.5 Stunden zur Verfügung. Das spricht dafür, dass das Projekt innerhalb der offerierten Zeit umgesetzt werden kann. Ein wichtiger Grund für diese Einschätzung: Die Arbeitszeiten der Arbeitskollegen für Vorarbeiten oder zusätzliche Aufgaben, die nicht Teil dieser Diplomarbeit sind, sind in dieser Tabelle beziehungsweise Rechnung nicht enthalten. Für mein erstes SPS-Programmierprojekt ist dies ein erfreulicher Hinweis auf eine effiziente Umsetzung.

7.3 Evaluation der Zielerreichung

Die Evaluation der Zielerreichung ist ein entscheidender Schritt, um den Erfolg des Projekts zu bewerten. Dabei wird analysiert, inwieweit die definierten Ziele erreicht wurden und ob das Endprodukt den festgelegten Anforderungen entspricht. Am einfachsten gelingt dies, indem die erzielten Ergebnisse den zuvor definierten Erfolgskriterien gegenübergestellt werden.

1. Es liegt eine vollständige Projektdokumentation im Format A4 vor.
 - Es können keine Abweichungen zum 4-Phasenmodell festgestellt werden und es müssen max. 10 Verständnisfragen geklärt werden.

Die Dokumentation ist vollständig und im A4-Format verfasst worden. Sie wurde gemäss dem 4-Phasenmodell erstellt. Es gab keine Verständnisfragen seitens des Begleitenden Diplomlehrer.

2. Eine Analyse der Ausgangslage ist durchgeführt und beschrieben.
 - Die Analyse liefert belegbare Daten und Erkenntnisse, die als Grundlage für weitere Entscheidungen und Massnahmen dienen.

Eine umfassende Analyse mit belegbaren Daten und Erkenntnissen wurde durchgeführt und vom Fachexperten als brauchbar bewertet.

3. Die Projektstruktur- sowie Projektablaufplanung ist erstellt.

- Der Detaillierungsgrad sowie die logische Abfolge der Arbeitspakete wird durch den Kunden als sinnvoll und zweckmässig beurteilt.

Die Projektstruktur- und Projektablaufplanung wurde erstellt und stellt eine klare sowie durchdachte Gliederung des Projekts sicher. Der Detaillierungsgrad der Arbeitspakete sowie deren logische Abfolge wurden vom Fachexperten als sinnvoll und zweckmässig bewertet.

4. Ein vollständig getestetes, dokumentiertes und betriebsbereites SPS-Programm, das alle in der Betriebsanleitung beschriebenen Funktionalitäten implementiert.

- Es liegt eine vollständig umgesetzte SPS-Programmierung vor, nach der Norm IEC 61131, die mehrheitlich in der Funktionsbausteinsprache realisiert wurde.

Alle Funktionalitäten wurden vor Ort oder in der Simulation erfolgreich getestet, die korrekte Funktionsweise wurde sowohl vom Fachexperten als auch vom Kunden bestätigt. Die Betriebsanleitung wurde während des Projekts überarbeitet; sie umfasst nun teilweise erweiterte Funktionalitäten und enthält in mehreren Abschnitten präzisere Beschreibungen.

5. Alle erforderlichen Eingänge, Ausgänge und Signale sind mit der OPM synchronisiert.

- Die Wärmepumpensteuerung ist vollständig in das bestehende Leitsystem des Kraftwerks Göschenen integrierbar.

Der Datenpunkttest wurde erfolgreich durchgeführt, sämtliche erforderlichen Ein- und Ausgänge sowie Signale sind mit der OPM synchronisiert. Die für das Leitsystem des Kraftwerks Göschenen benötigten Signale stehen vollständig und funktionsfähig zur Verfügung, sodass die Wärmegruppensteuerung vollständig integrierbar ist.

6. Sensoren und Aktoren liefern präzise Messwerte, die in der weiteren Verarbeitung verwendet werden.

- Sämtliche im Projekt eingesetzten Sensoren und Aktoren liefern korrekte Werte, die in der Steuerung verarbeitet und über das Leitsystem ausgelesen werden können.

Die eingesetzten Sensoren und Aktoren liefern durchgehend plausible und korrekte Messwerte, die in der Steuerung zuverlässig eingelesen und weiterverarbeitet werden. Sämtliche Werte können vom Leitsystem ausgelesen und in tabellarischer sowie grafischer Form dargestellt werden.

7. Kritische Funktionen werden in einer geschlossenen Simulation vor der Inbetriebnahme getestet und dokumentiert.

- Die Simulation bildet die spätere Steuerungslogik soweit als sinnvoll ab und ermöglicht eine verkürzte Inbetriebnahme.

Die Simulation bildet die Steuerungslogik der Wärmepumpe 1 sowie der übergeordneten Steuerung mit Kühlwasserpumpe und Tanks ab. Sie deckte bereits zahlreiche potenzielle Fehlerfälle ab, sodass zur Inbetriebnahme keine unerwarteten Überraschungen zu erwarten sind und der Ablauf entsprechend verkürzt und abgesichert wird.

8. Das SPS-Programm wird gemäss der Reihenfolge des Projekt-Inbetriebsetzungsplans entwickelt.

- Die Inbetriebnahmebereitschaft und die erfolgreiche Durchführung der Simulation sind bis spätestens 1. September 2025 erreicht.

Die Inbetriebnahmebereitschaft wurde bereits Ende Kalenderwoche 34 erreicht. Die Anpassungen der Reihenfolge im Inbetriebsetzungsplan wurden korrekt übernommen, sodass die Heizgruppen des Dachstocks sowie des Montageturms vorgezogen und vorab in Betrieb genommen wurden.

9. Es ist ein lessons learnt Bericht verfasst und in der Dokumentation berücksichtigt.

- Der Bericht zeigen mind. 2 Erkenntnisse auf, die in zukünftigen Projekten besonderer Beachtung benötigen.

Einen lessons-learnt-Bericht wurde verfasst, der in der Dokumentation berücksichtigt wurde. Diese Berichte enthalten mindestens zwei zentrale Erkenntnisse, die für zukünftige Projekte besonders relevant sind.

10. Die Projektarbeit ist anlässlich eines Vortrages dem Auftraggeber präsentiert.

- Sämtliche Vorgaben zu den Inhalten der Präsentation wurden berücksichtigt.

Die Projektpräsentation findet in Kalenderwoche 48 oder 49 an der TEKO Luzern in einem Schulzimmer statt. Die Inhalte entsprechen den Vorgaben der TEKO sowie des begleitenden Diplomlehrers.

7.3.1 Fazit Evaluation der Zielerreichung

Die Evaluation bestätigt eine vollumfängliche Zielerreichung. Dokumentation, Analyse und Planung entsprechen den Vorgaben; das SPS-Programm ist normgerecht umgesetzt, getestet und betriebsbereit. Alle Signale sind mit der OPM synchronisiert, Sensoren und Aktoren liefern verlässliche Messwerte, und die erfolgreiche Simulation verkürzte die Inbetriebnahme. Die Inbetriebnahmebereitschaft wurde fristgerecht erreicht, ein Lessons Learnt Bericht ist berücksichtigt, und die Abschlusspräsentation erfolgt gemäss Vorgaben. Insgesamt erfüllt das Projekt sämtliche Erfolgskriterien.

7.4 Lessons Learnt

Im Verlauf des Projekts traten Höhen und Tiefen auf, Herausforderungen wurden bewältigt und Erfolge erzielt. Jeder Schritt erwies sich als bedeutsam und lieferte wertvolle Erkenntnisse. Das Kapitel „Lessons Learnt“ dient dazu, die Projektphase rückblickend zu betrachten und die gewonnenen Lehren systematisch zu reflektieren.

7.4.1 Reflexion

Während der Umsetzung meiner Diplomarbeit zur SPS-Programmierung der Wärmegruppe der KWG AG habe ich fachlich und organisatorisch viel gelernt. Der Einstieg war anspruchsvoll, denn CAExPlus, relevante Normen, Handbücher und Schnittstellen waren neu, und die Wärmegruppe ist bei KWG ein Unikat ohne direktes Referenzprojekt. Diese anfänglichen Unsicherheiten habe ich durch gezielte Einarbeitung und enge Abstimmungen Schritt für Schritt abgebaut. Die Betriebsanleitung diente mir dabei als fachliches Fundament. Dank ihr konnte ich die gestaffelte Programmierung und Inbetriebnahme mit vollständigem Funktionsumfang zielgerichtet umsetzen, da sie den Grossteil der Anforderungen abdeckte. Offene Punkte habe ich gemeinsam mit dem Betreiber geklärt, was für mich besonders spannend war, weil es häufig mehrere sinnvolle Lösungswege gab.

Im Rückblick stand für mich das Zusammenspiel aus Planung, Priorisierung und einer auf die Inbetriebnahme ausgerichteten Entwicklung im Mittelpunkt. Ein wichtiger Fixpunkt war die Inbetriebnahmebereitschaft bis zum 01.09.2025. Die definierten Softwareteile mussten fristgerecht realisiert und geprüft werden. Entsprechend habe ich das SPS-Programm entlang des Inbetriebsetzungsplans entwickelt und die Inbetriebnahmebereitschaft bereits Ende KW 34 erreicht. Das war ein wichtiger Vertrauensgewinn für die weiteren Schritte.

Die Auswertung meines Arbeitsjournals zeigte, dass der Aufwand im August und Anfang September deutlich anstieg, mit hohem Dokumentationsanteil sowie mehr Abend- und Wochenendblöcken. Diese intensive Phase hat meine Freizeit spürbar reduziert, war aber für einen sauberen Abschluss der Dokumentation und Tests notwendig.

Technisch haben vor allem konsequente Offline-Tests und die Simulation den Fortschritt geprägt. Sie gaben mir die Sicherheit, dass meine Überlegungen und Konzepte in der Praxis tragen. Gleichzeitig deckten sie nicht zu Ende gedachte Steuerungsansätze auf, die zum Beispiel bei Störungen nicht robust genug reagiert hätten. Denkfehler und Prioritätskonflikte wurden so früh sichtbar, liessen sich iterativ nachschärfen und beschleunigten die spätere Inbetriebnahme deutlich.

In der Inbetriebnahmephase wurden Messungen und Optimierungsversuche besonders greifbar. Den Umgang mit dem integrierten Oszilloskop, die Reglerauslegung und die Interpretation von Trendverläufen sowie die Optimierung der Mischventile habe ich iterativ anhand realer Tests verfeinert. Dabei konnte ich stark vom Praxiswissen von Stefan Bächler profitieren.

Mitten im Projekt war ich zunehmend unzufrieden mit der Navigation und Auffindbarkeit innerhalb der Steuerung nach CKW-Richtlinien. Zusammenhänge musste ich oft mühsam über verschiedene Typinstanzen hinweg suchen, und mitunter war unklar, wo sich bestimmte Seiten befanden. Parallel habe ich deshalb einen Piloten zum funktionalen Engineering erarbeitet. Ziel war eine Arbeitsweise in CAExPlus, die Anwenderinnen und Anwender sowie Nutzende gleichermaßen unterstützt. Die ausgewählte Variante mit dem Namen «Funktionen, die funktionieren» erwies sich in Präferenzanalysen und Sensitivitätsanalysen als robust. Sie übernimmt Bewährtes aus der bisherigen Arbeitsweise und verbindet es mit einem funktionsorientierten Aufbau. Für mich bleibt vor allem, dass eine saubere und modulare Struktur mit konsistenten Benennungen und klaren Schnittstellen der effektivste Weg ist, Komplexität zu beherrschen und Risiken zu reduzieren.

Fachlich war die Zusammenarbeit mit meinem Fachexperten Stefan Bächler äusserst lehrreich und angenehm. Für die Möglichkeit, diese Arbeit umzusetzen, danke ich CKW, insbesondere meinem Vorgesetzten Bruno Kieser aus dem Team NEPE, der die Umplanung meiner ursprünglichen Arbeit ermöglicht hat, und Peter Ulrich aus dem Team NESL, der mir die Aufgabe anvertraut und die notwendigen Vorbereitungen unterstützt hat.

Die SPS-Welt unterscheidet sich in vielem von dem, was ich beruflich bis jetzt gemacht habe, und ist auch vom Umfang her deutlich umfangreicher als das, was ich in der Weiterbildung kennengelernt habe. Vieles aus den Fächern SPS und Digitaltechnik konnte ich anwenden. Den praktischen Zugang zur Reglerauslegung mit Tests und Versuchen habe ich jedoch erst durch diese Diplomarbeit wirklich erlernt.

Alles in allem bin ich sehr zufrieden und habe wertvolle Erfahrungen gewonnen, die meine zukünftige Arbeit in Planung, Methodik und Umsetzung nachhaltig prägen werden.

8 Redlichkeitserklärung

Der Verfasser bestätigt mit seiner Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel erstellt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Unterschrift:

Ort / Datum: Luzern / 17.09.25



David Teixeira

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Heizraum nach abgeschlossenem Umbau, 05.09.2025.....	1
Abbildung 2: OMP2, vorbereitete Belegung.....	9
Abbildung 3: Projektauftrag.....	10
Abbildung 4: Bewertungsraster.....	11
Abbildung 5: TOOLBOX II, Startfenster.....	16
Abbildung 6: CAExPlus, Benutzeroberfläche.....	17
Abbildung 7: Heizraum während des Umbaus, 22.08.2025.....	18
Abbildung 8: SICAM A8000 im Schaltschrank, unterhalb der Sicherungen.....	18
Abbildung 9: Neue Wärmepumpe während des Umbaus, 05.09.2025.....	19
Abbildung 10: Bestehender Elektrodurchlauferhitzer.....	20
Abbildung 11: Neues Mischventil am Elektrodurchlauferhitzer.....	21
Abbildung 12: Neue Umwälzpumpen.....	22
Abbildung 13: Drei bestehende Wärmespeicher, 6000 L je Speicher.....	23
Abbildung 14: Bestehende zwei Kühlwassertanks mit Füllstandsüberwachung.....	24
Abbildung 15: Bestehende Ausdehnungsgefässe.....	25
Abbildung 16: Neuer Jetfilter.....	26
Abbildung 17: Luftheizapparat mit Strangreguliertventil.....	27
Abbildung 18: TI_I_BS, Seite 1, Binäre Eingänge A8000, Baugruppe PBA0, Karte MOD5.....	44
Abbildung 19: TI_I_BS, Seite 6, Interne Variablen, Vorverarbeitung auf Seite 15.....	45
Abbildung 20: TI_I_BS, Seite 15, Vorverarbeitung interner Variablen zu globalen Variablen.....	45
Abbildung 21: TI_I_BS, Seite 7, Binäre Befehle von der Visualisierung.....	46
Abbildung 22: TI_I_AS, Seite 1, Analoge Werte A8000, Baugruppe PBA0, Karte MOD3.....	47
Abbildung 23: TI_I_AS, Seite 10, Sollwerte aus der Visualisierung.....	48
Abbildung 24: TI_I_AS, Seite 11, Vorverarbeitung der Sollwert-Uhrzeiten.....	49
Abbildung 25: TI_I_AS, Seite 15, Schaltuhr, Betriebsgebäude.....	50
Abbildung 26: TI_I_AS, Seite 27, Grenzwerte, Kühlwassertank-Niveau.....	51
Abbildung 27: TI_I_AS, Seite 28, Grenzwerte, Temperatur und Durchfluss.....	52
Abbildung 28: TI_V_RG, Seite 1, Ein- und Ausschaltbedingungen, übergeordneter Regler.....	54
Abbildung 29: TI_V_RG, Seite 2, PH Basis des Übergeordneten Regler.....	54
Abbildung 30: TI_V_RG, Seite 3, Übergeordneten Regler.....	55
Abbildung 31: TI_V_RG, Seite 5, Begrenzungsregler, Elektrodurchlauferhitzer.....	56
Abbildung 32: TI_V_RG, Seite 8, Betriebsstundenzähler der einzelnen Heizstäbe des Elektrodurchlauferhitzers.....	57
Abbildung 33: TI_V_RG, Seite 11, Heizstäben zuschaltung des Elektrodurchlauferhitzers.....	58
Abbildung 34: TI_V_RG, Seite 20, PI-Regler für die Verdampferpumpe der Wärmepumpe 1.....	59
Abbildung 35: TI_V_RG, Seite 20, Mischventil, Heizgruppe Betriebsgebäude.....	61
Abbildung 36: Übersicht der Abkürzungen bei TI_V_ES.....	62
Abbildung 37: TI_V_ES, Seite 2, Sicherheitsabschaltbedingungen, Elektrodurchlauferhitzer.....	63
Abbildung 38: TI_V_ES, Seite 3, Einzelsteuerung Heizstab 1.....	64
Abbildung 39: TI_V_ES, Seite 11, Einzelsteuerung Zirkulationspumpe.....	64
Abbildung 40: TI_V_ES, Seite 12, Pumpenwahl der Wohnkolonie.....	65
Abbildung 41: TI_V_ES, Seite 13, Einzelsteuerung Pumpe der Wohnkolonie.....	66
Abbildung 42: TI_V_ES, Seite 20, Einzelsteuerung der Plattentaucher Klappe.....	68
Abbildung 43: TI_V_ES, Seite 22, Auswahl der Wärmepumpen.....	69
Abbildung 44: TI_V_ES, Seite 23, selbsterstelltes Wärmepumpenmakro.....	70

Abbildung 45: TI_V_ES, Seite 25, Einzelsteuerung Verdampferpumpe der Wärmepumpe 1.....	71
Abbildung 46: TI_V_ES, Seite 17, Freigabe der Umwälzpumpen und vorlauf des Jetfilters.....	72
Abbildung 47: TI_V_ES, Seite 18, Einzelsteuerung Umwälzpumpe	73
Abbildung 48: TI_V_ES, Seite 32, Einzelsteuerung der Luftheizapparate	74
Abbildung 49: TI_V_ES, Seite 33, Einzelsteuerung des Abluftventilatoren	75
Abbildung 50: TI_O_SV, Seite 1, Ausgängen vom A8000 nach Baugruppe, Karte und Stecker sortiert.	76
Abbildung 51: TI_O_SV, Seite 10, mit zusätzlichen Bausteinen für die Visualisierung.....	77
Abbildung 52: TI_O_SV, Seite 18, Verknüpfung von den Laufzeitüberschreitungen zu einer Sammelwarnung	78
Abbildung 53: Übersicht der Simulation der Wärmepumpe	81
Abbildung 54: Seite mit den Ausgängen und Simulation Funktionsbausteinen	82
Abbildung 55: Bildschirmaufnahme Elektrodurchlauferhitzer Reaktion mit Oszilloskop.....	84
Abbildung 56: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 1, 22.08.2025, optimiert.....	85
Abbildung 57: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 2, 22.08.2025, optimiert.....	86
Abbildung 58: Elektrodurchlauferhitzer, Mischventil, Versuch 3, 22.08.2025, optimiert.....	87
Abbildung 59: Elektrodurchlauferhitzer, Begrenzungsregler, Versuch 1, Mischventil defekt	88
Abbildung 60: Elektrodurchlauferhitzer, Begrenzungsregler, Versuch 2, Mischventil defekt	89
Abbildung 61: Heizgruppe Betriebsgebäude, Mischventil, Versuch 1, 22.08.2025.....	90
Abbildung 62: Übersichtsansicht von TI_I_AS	104
Abbildung 63: Ausschnitt aus Engineering Manual CAExPlus.....	104
Abbildung 64: Ausschnitt aus dem Handbuch von CAExPlus (F11).....	105
Abbildung 65: Typinstanz Heizgruppe Wohnkolonie Funktional mit neuem Layout Mini	106
Abbildung 66: Typinstanz überordnet mit neuem Layout Maxi	107
Abbildung 67: TI_V_ES, Seite 20, Einzelsteuerung der Plattentaucher Klappe mit Markierungen für Konnektoren.....	109
Abbildung 68: Ausschnitt aus dem Arbeitsjournal.....	114

10 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Leistung der Wärmepumpen laut Betriebsanleitung.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 2: Eisenhower-Matrix der Priorisierungsmethode.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 3: Präferenzmatrix der Varianten</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 4: Nutzwertanalyse der Varianten</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 5: Präferenzmatrix der Varianten - Sensitivitätsanalyse.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 6: Nutzwertanalyse der Varianten - Sensitivitätsanalyse.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 7: Layout Variante Mini.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabelle 8: Layout Variante Maxi.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabelle 9: Abarbeitungsreihenfolge der CKW-Richtlinie</i>	<i>108</i>
<i>Tabelle 10: SWOT-Analyse der ausgewählten Variante</i>	<i>110</i>
<i>Tabelle 11: Pivot Tabelle der Summen Stunden nach Kategorie und Tätigkeit</i>	<i>117</i>
<i>Tabelle 12: Gegenüberstellung Offerte und geleistete Stunden</i>	<i>118</i>

11 Diagrammverzeichnis

<i>Diagramm 1: Organigramm der Projektorganisation.....</i>	<i>34</i>
<i>Diagramm 2: Zielscheibe</i>	<i>36</i>
<i>Diagramm 3: Projektstrukturplanung.....</i>	<i>38</i>
<i>Diagramm 4: Gantt Diagramm</i>	<i>39</i>
<i>Diagramm 5: CKW Projektphase Diagramm.....</i>	<i>40</i>
<i>Diagramm 6: Netzplan der Arbeitspakete</i>	<i>41</i>
<i>Diagramm 7: Übersicht übergeordneter Regler</i>	<i>53</i>
<i>Diagramm 8: Funktionsweise des Begrenzungsreglers.....</i>	<i>56</i>
<i>Diagramm 9: Quasi-stetiges Verhalten von Mischventilen.....</i>	<i>60</i>
<i>Diagramm 10: Übersicht Elektrodurchlauferhitzer.....</i>	<i>63</i>
<i>Diagramm 11: Übersicht Wärmepumpe.....</i>	<i>67</i>
<i>Diagramm 12: SCAMPER-Diagramm</i>	<i>92</i>
<i>Diagramm 13: Gantt Diagramm Controlling</i>	<i>113</i>
<i>Diagramm 14: Säulendiagramm mit Aufwand nach Monat und Tageszeitunterteilung.....</i>	<i>115</i>
<i>Diagramm 15: Säulendiagramm mit Aufwand nach Tag und Tageszeitunterteilung.....</i>	<i>115</i>
<i>Diagramm 16: Kreisdiagramm nach Kategorie</i>	<i>116</i>

12 Literaturverzeichnis

2025. Chatgpt. [Online] 09 2025. <https://chatgpt.com/>.

CKW AG. 2025. *03_Anl_Leittechnik_Heizung_Rev0_de.* 2025.

SAT Automation. 2025. *Engineering Manual CAExPlus (DE) Rev[1][1].2.* 09 2025.

Siemens AG. 2025. *Manual_CP-8000_CP-802x_GER_DC8-036-2.05.* 2025.

2025. Wikipedia. [Online] 09 2025. <https://de.wikipedia.org/>.

13 Anhang

1. *Betriebsanleitung (Pflichtenheft)*
2. *CAExPlus SPS-Programmierung (FBS)*
3. *Prinzipschemas*
4. *Projektstatusberichte*
5. *Richtlinien CKW*
6. *Prüfprotokole*
7. *Beschreibung Selbsterstellte Makros*
8. *Beschreibungen von Makro*
9. *Manuals*