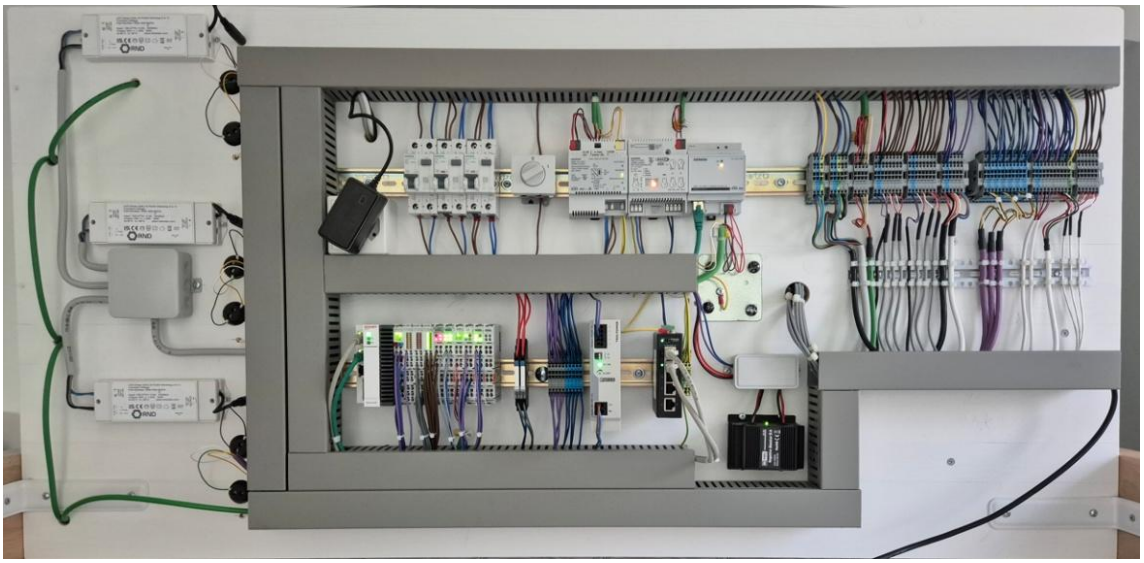
# Diplomarbeit

## Gebäudeautomation-Testaufbau





| | |
|---|---|
| Schule: | TEKO Schweizerische Fachschule |
| Klasse: | S-TGA-23-Di-z |
| Diplomand: | Marco Boccia |
| Diplomlehrer: | Dr. Lukas Kurmann |
| Studiengang: | Dipl. Gebäudeautomatiker HF |

# Inhaltsverzeichnis

I Management Summary ..... 6
II Lebenslauf ..... 7
III Qualifikationsprofil ..... 9
1 Konzeptionierung ..... 10
1.1 Themenfindung und Projektwahl ..... 10
1.2 Ausgangslage und Aufgabenstellung ..... 10
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung ..... 11
1.4 Projektorganisation und Ressourcen ..... 11
1.5 Termin- und Stundenplanung ..... 13
1.6 Tatsächlicher Projektverlauf ..... 15
2 Lösung der Aufgabe ..... 16
2.1 Gesamtsystem und Systemarchitektur ..... 16
2.2 KNX und DALI ..... 18
2.3 BACnet/IP und Ethernet-Netzwerk ..... 18
2.4 MP-Bus und Modbus RTU ..... 19
2.5 Beckhoff SPS und konventionelle I/O ..... 20
2.6 Heiz-/Kühlkonzept und Räume ..... 21
2.7 Bedien- und Prioritätskonzept ..... 22
3 Planung und Realisierung ..... 24
3.1 Aufbau ..... 24
3.2 Elektrischer Aufbau und Spannungsversorgung ..... 31
3.3 SPS und I/O ..... 33
3.4 Raumautomation und Beleuchtung ..... 33
3.5 Heiz-/Kühlkomponenten ..... 35
3.6 Feldbus- und Netzwerkintegration ..... 38
3.7 Bedien- und Visualisierungssysteme ..... 39
4 Software und Steuerung 4.1 Softwarearchitektur TwinCat 3 ..... 40
4.2 Kommunikationsschnittstellen ..... 42
4.3 Lichtsteuerung ..... 44
4.4 Raumfunktionen ..... 45
4.5 Heiz-/Kühlfunktionen ..... 47
4.6 Bedienpriorität und Handbetrieb ..... 48

4.7 Alarm- und Sicherheitsfunktionen ..... 49
4.8 WebVisualisierung ..... 50
5 Inbetriebnahme und Funktionskontrolle ..... 52
5.1 Vorgehen bei der Inbetriebnahme ..... 52
5.2 Prüfung der Ein- und Ausgänge ..... 53
5.3 Prüfung der Kommunikationssysteme ..... 53
5.4 Prüfung der Anlagen- und Raumfunktionen ..... 55
5.5 Prüfung von Bedienung und Alarmfunktionen ..... 56
5.6 Fehler, Korrekturen und Testergebnisse ..... 57
6 Technische Dokumentation ..... 59
6.1 Elektro- und Prinzipschema ..... 59
6.2 Datenpunkt- und I/O Dokumentation ..... 59
6.3 Funktionsbeschrieb und Inbetriebnahmeunterlagen ..... 59
6.4 Software- und Projektunterlagen ..... 60
7 Reflexion und Projektbewertung ..... 61
7.1 Zielerreichung ..... 61
7.2 Soll-/Ist-Vergleich ..... 63
7.3 Wesentliche Projektänderungen und Herausforderungen ..... 64
7.4 Lessons Learned ..... 64
7.5 Verbesserungspotential und Ausblick ..... 65
8 Schluss ..... 66
8.1 Persönliches Schlusswort ..... 66
8.2 Verdankung ..... 67
9 Eigenständigkeitserklärung ..... 68
10 Disclaimer ..... 69
11 Glossar ..... 70
12 Anhänge ..... 71

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einkaufsliste ..... 12
Abbildung 2: Ursprünglicher Terminplan mit Arbeitspaketen ..... 13
Abbildung 3: Angepasster Terminplan und Arbeitspakete ..... 14
Abbildung 4: Tatsächlicher Projektverlauf mit Arbeitspaketen ..... 15
Abbildung 5: Erstes ausgearbeitetes Systemkonzept ..... 16
Abbildung 6: Finale Systemtopologie ..... 17
Abbildung 7: KNX-Komponenten des Testaufbaus ..... 18
Abbildung 8: KNX/BACnet-Gateway ..... 18
Abbildung 9: MP-Bus-Antrieb (hellblau) und Modbus-Antrieb (dunkelblau) ..... 19
Abbildung 10: Beckhoff-Klemme für MP-Bus ..... 19
Abbildung 11: Beckhoff-Klemme für Modbus RTU ..... 19
Abbildung 12: Beckhoff CX8191 mit K-Bus-Klemmen ..... 20
Abbildung 13: Hydraulisches Prinzipschema ..... 21
Abbildung 14: Kommunikationsweg der KNX-Taster ..... 22
Abbildung 15: Kommunikationsweg des KNX-Touchpanels ..... 23
Abbildung 16: Kommunikationsweg des übergeordneten Touchpanels ..... 23
Abbildung 17: Erste Layoutskizze auf Floorliner ..... 24
Abbildung 18: Probeplatzierung der Komponenten zur Prüfung der Abmessungen ..... 24
Abbildung 19: Zuschnitt und Zusammenbau der Holzbauteile ..... 25
Abbildung 20: Oberflächenbearbeitung und Vorbereitung der Standfüsse ..... 26
Abbildung 21: Montage der Standfüsse ..... 27
Abbildung 22: Zusätzliche Verstärkungen und Befestigungsteile ..... 28
Abbildung 23: Vorderseite während der Montage ..... 29
Abbildung 24: Planung der Kanäle und DIN-Schienen mit Klebeband ..... 29
Abbildung 25: Montage der Kabelkanäle und DIN-Schienen ..... 30
Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Elektroschema: Einspeisung ..... 31
Abbildung 27: Beginn der Verdrahtungsarbeiten ..... 31
Abbildung 28: Verdrahtung der Reihenklemmen ..... 32
Abbildung 29: Rückseite nach der Verdrahtung ..... 32
Abbildung 30: Eingelesene K-Bus-Struktur in TwinCAT 3 ..... 33
Abbildung 31: Anordnung der drei Demonstrationsräume ..... 33
Abbildung 32: DALI-Betriebsgeräte auf der Rückseite ..... 34
Abbildung 33: Früher Entwurf des Aufbaus ..... 35
Abbildung 34: Fussbodenheizverteiler ..... 35
Abbildung 35: Temperaturfühler mit Isolierung an der Rohrleitung ..... 36
Abbildung 36: Vorderseite des aufgebauten Testsystems ..... 37
Abbildung 37: BACnet Objekte im ETS 6 ..... 38
Abbildung 38: I/Os werden von der Karte gelesen und zur GVL weitergeleitet ..... 40
Abbildung 39: Von der GVL gehts zum PRG wo es weitergeleitet wird ..... 40
Abbildung 40: Einlesen der DALI-Dimmrücmeldungen über KNX ..... 42
Abbildung 41: Umsetzung der Raumbetriebsarten auf BACnet Statuswerte ..... 42
Abbildung 42: Erfolgreiche MP-Bus-Kommunikation mit dem Belimo-Antrieb ..... 43
Abbildung 43: Verarbeitung und Überwachung der Modbus-Kommunikation zum TA-Slider ..... 43

Abbildung 44: Gruppenadressen für die Lichtsteuerung ..... 44
Abbildung 45: Ausschnit vom Programm das den Funktionsbaustein FB_Taster aufruft und die Variablen mit den GVL's weitergibt ..... 44
Abbildung 46: Softwareausschnitt Raumlogik Demonstrationsbetriebs..... 45
Abbildung 47: VISU der HK-Anlage..... 47
Abbildung 48: Softwareausschnitt Online: Vor "Alles Auto" drücken ..... 48
Abbildung 49: Softwareausschnitt Online: Nach "Alles Auto" drücken ..... 48
Abbildung 50:Anzeiege der Störung auf dem Touchpanel ..... 49
Abbildung 51:Anlage HK VISU ..... 51
Abbildung 52:Räume VISU ..... 51
Abbildung 53: Beispiel einer geprüften Schemaseite..... 52
Abbildung 54: Werteingabe zum testen direkt auf der Karte selber..... 53
Abbildung 55: Onlineprüfung der über BACnet/IP übertragenen Raumbetriebsarten ..... 54
Abbildung 56: Ansteuerung Soll Position Change-Over Stellantrieb..... 54
Abbildung 57: Programmausschnitt Ansteuerung TA-Slider auf 100% ..... 55
Abbildung 58: Softwareausschnit Onlineprüfung des Mehrheitsentscheids der drei Raumwünsche.. 56
Abbildung 59:Vorderwand Jetzt ..... 62
Abbildung 60:Rückwand Jetzt ..... 62

# I Management Summary

Diese Diplomarbeit dokumentiert die Planung, den Aufbau und die Inbetriebnahme eines Gebäudeautomation-Testaufbaus. Ziel war es, unterschiedliche Kommunikationssysteme und Feldgeräte miteinander zu verbinden und ihre Ansteuerung anschaulich darzustellen. Die Wand soll nach Abschluss der Arbeit bei der SCHERLER AG insbesondere für eigene Lernzwecke, die Ausbildung von Lernenden und technische Tests genutzt werden. Zusätzlich eignet sie sich für Demonstrationen gegenüber Kunden.

Der Aufbau umfasst drei Demonstrationsräume mit Tastern, dimmbarer LED-Beleuchtung, Temperaturerfassung und Betriebsanzeigen sowie eine gemeinsame Heiz- und Kühlverteilung. Diese besteht aus zwei Tanks, Pumpen, einem Change-over-Ventil und einem Fussbodenheizverteiler mit Raumstellantrieben. Die zentrale Beckhoff CX8191 verbindet KNX, DALI, BACnet/IP, MP-Bus und Modbus RTU mit konventionellen digitalen und analogen Ein- und Ausgängen. Die Bedienung erfolgt über lokale KNX-Taster, ein KNX-Touchpanel sowie ein übergeordnetes Touchpanel mit WebVisualisierung.

Die Arbeit umfasste die Materialauswahl und Beschaffung, den mechanischen und elektrischen Aufbau, die Verrohrung, die Projektierung der Bussysteme, die SPS-Programmierung und die Erstellung der Visualisierung. Ergänzend entstanden unter anderem Pflichtenheft, Elektroschema, Prinzipschema, Systemtopologie, Funktionsbeschrieb und Datenpunktliste. Die SCHERLER AG stellte die Beckhoff-Komponenten und verschiedene KNX-Komponenten zur Verfügung. Für die übrigen, selbst finanzierten Komponenten und Materialien entstanden Kosten von rund CHF 4'100; die bereitgestellten Komponenten sind darin nicht enthalten.

Die Inbetriebnahme erfolgte schrittweise. Ein- und Ausgänge sowie die zugehörigen Gerätefunktionen wurden anhand des Elektroschemas geprüft und mit Prüfvermerk und Datum bestätigt. Als wesentliches Ergebnis konnten die Kommunikationswege und die Ansteuerung der Feldgeräte umgesetzt werden. Die Beleuchtung lässt sich schalten und dimmen, die Bediengeräte sind funktionsfähig und die angeschlossenen Antriebe können angesteuert werden. Damit ist der zentrale Projektzweck, verschiedene Technologien in einem bedienbaren Testaufbau zusammenzuführen, erreicht.

Nicht abgeschlossen werden konnte die zusätzlich angestrebte automatische Raum- und Anlagenregelung. Der Regelungsteil funktionierte bei der Inbetriebnahme nicht wie vorgesehen. Für den abschliessenden Demonstrationsbetrieb wurde deshalb ein Softwarestand mit direkter Ansteuerung eingesetzt. Die Temperaturwerte dienen dabei der Anzeige, nicht der automatischen Regelung. Eine aktive Wärme- oder Kälteerzeugung war nicht Bestandteil des Projekts.

Der tatsächliche Arbeitsaufwand lag mit deutlich über 400 Stunden wesentlich über den vorgesehenen 240 Stunden. Dazu trugen insbesondere der unterschätzte Montageaufwand, zusätzliche Stabilisierungsmassnahmen, Lieferverzögerungen, defekte Geräte sowie die Einarbeitung in die Schema- und Automationssoftware bei. Trotz der offenen Regelungsfunktionen entstand eine nutzbare Lern- und Testplattform. Die vorhandene Hardware und die verschiedenen Schnittstellen bilden eine Grundlage für weitere Programmierarbeiten, Regelungsversuche und die spätere Erprobung zusätzlicher Geräte.

# II Lebenslauf

## LEBENSLAUF

### Persönliche Angaben

| | |
|---|---|
| Vor- und Nachname: | Marco Boccia |
| Geburtsdatum: | 22.04.2001 |
| Geburtsort: | Basel |
| Zivilstand: | ledig |
| Nationalität: | Schweiz |
| Sprachen: | Deutsch, Italienisch, Englisch |



### Bildung

| | |
|---|---|
| 10/2023 – 10/2026 | dipl. Gebäudeautomatiker HF an der TEKO Basel |
| 08/2016 - 08/2019 | Lehre als Montageelektriker EFZ an der AGS-Basel |

### Berufliche Tätigkeiten

11/2024 – heute

Engineering Gebäudeautomation
SCHERLER AG
Tätigkeiten:

- Mitwirkung bei Erstellung und Korrekturen von Elektroschematas
- Planung von Gebäudeautomation, um dann an ausführende weiterzugeben
- Erstellung Datenpunkt-Auszüge für HLKKSE Anlagen
- Gelegentliche Ausführung KNX-Systeme
- Gelegentliche Bearbeitung von SPS-Steuerungen
- Gelegentliche Störungssuche
- Wartung von abgeschlossenen Projekten
- Bearbeitung von SPS-Steuerungen

11/2022 - 10/2024

Inbetriebsetzungstechniker Gebäudeautomation
Lippuner EMT AG
Tätigkeiten:

- Teilnahme an bauseitigen Sitzungen
- Programmierung SPS: Beckhoff
- Inbetriebnahme von HLKS-Anlagen
- Inbetriebnahme von Raumautomation
- Umbauten/Zusatz von Schaltschränken

| | |
|---|---|
| 11/2021 - 10/2022 | Junior Inbetriebsetzungstechniker Lüftung<br>Klima AG (Hälg Group)<br>Tätigkeiten:<br>• Parametrierung von Frequenzumformer, Differenzdruckwächter und Volumenstromregler<br>• Montage diverser Feldgeräten und Antrieben<br>• Luftmengenmessungen<br>• Protokollerstellung von Frequenzumformer sowie Luftmengenmessungen |
| 09/2019 - 03/2021 | Montageelektriker<br>Bouygues Energies & Services (vorher Alpiq InTec Schweiz AG)<br>Tätigkeiten:<br>• Ausführung Elektroinstallationen<br>• Kabelzug und Anschluss von HLKKSE Geräten und MSR SGK's (zusammenarbeit mit GA-Firmen)<br>• Montage und Anschluss von Leuchten<br>• RDA- und RWA-Kabelzug<br>• EDV-Kabelzug |
| 08/2016 – 08/2019 | Lehre Montageelektriker EFZ<br>Alpiq InTec Schweiz AG<br>Tätigkeiten:<br>• Ausführung Elektroinstallationen<br>• Kabelzug und Anschluss von HLKKSE Geräten und MSR SGK's (zusammenarbeit mit GA-Firmen)<br>• Montage und Anschluss von Leuchten<br>• Provisorische Internet und TV-Kabelverlegung<br>Für Swiss Indoors |

# III Qualifikationsprofil

Das Qualifikationsprofil fasst ausgewählte Kompetenzen aus meinem Lernjournal zusammen. Die Beispiele stammen aus meiner beruflichen Tätigkeit und der Diplomarbeit. Die Kompetenznummern stellen den Bezug zu den ausführlichen Einträgen im Lernjournal her.

## Führung, Zusammenarbeit und Qualität (A1.9–A1.12; A1.18)

Ich kann Aufgaben strukturieren, Mitarbeitende anleiten und Arbeitsergebnisse kontrollieren. Bei der Erstellung von Datenpunktlisten koordinierte ich sechs Mitarbeitende. Dafür bereitete ich eine OneNote-Anleitung mit Arbeitsschritten und Dokumentpfaden vor, erklärte das Vorgehen und prüfte die fertigen Listen. So konnten die Arbeiten nahezu fehlerfrei abgeschlossen werden. Diese Erfahrung zeigte mir, wie wichtig verständliche Vorgaben, Unterstützung und eine abschliessende Qualitätskontrolle für die Zusammenarbeit sind.

## Adressatengerechte Kommunikation (A2.1; A2.4; A2.7–A2.8)

Technische Informationen bereite ich so auf, dass Kunden, Elektriker und Vorgesetzte sie nachvollziehen können. Nach der Inbetriebnahme einer KNX-/DALI-Beleuchtung im Gastrobereich eines Spitals dokumentierte ich funktionierende, defekte und fehlende Komponenten in einer E-Mail. Ein ergänzter PDF-Plan zeigte die geprüften Bereiche und Buslinien. Bei Kundeneinsätzen kommunizierte ich zudem auf Englisch und mit italienischsprachigen Elektrikern auf Italienisch. Dabei passe ich die fachliche Tiefe an mein Gegenüber an.

## Persönliche Entwicklung und digitale Werkzeuge (A3.1–A3.4; B4.6–B4.7)

Ich erkenne eigenen Lernbedarf und erschliesse mir neue Werkzeuge durch Weiterbildung und praktische Anwendung. Ein Beckhoff-Basiskurs sowie selbstständige Recherchen halfen mir, meine TwinCAT- und KNX-Kenntnisse auszubauen. Für die zeitaufwendige Kontrolle von Datenpunktlisten entwickelte ich mit KI-Unterstützung eine Python-Lösung. Dazu präzisierte ich die Anforderungen anhand einer Excel-Vorlage und überprüfte die Ergebnisse schrittweise. Entscheidend war, generierte Vorschläge nicht ungeprüft zu übernehmen, sondern an die konkrete Aufgabe anzupassen.

## Probleme systematisch analysieren und lösen (B4.2–B4.3)

Bei Störungen prüfe ich mögliche Ursachen schrittweise. Als eine SPS im Leitsystem nicht mehr erreichbar war, kontrollierte ich zuerst die physische Verbindung und fand ein nicht richtig eingestecktes Patchkabel. Bei einer Einzelraumautomation erkannte ich durch eine Strommessung, dass ein Netzteil für die Konvektoren zu klein dimensioniert war. Diese Beispiele zeigen mir, dass Beobachtungen und Messungen eine bessere Entscheidungsgrundlage bilden als vorschnelle Neustarts oder Vermutungen.

## Projekte planen und Entscheidungen vorbereiten (B5.1; B5.6–B5.7; B7.1)

Für die Gebäudeautomationsplanung eines Schulhauses wertete ich die Unterlagen der HLK-Fachplaner aus und leitete daraus die benötigten Schaltgerätekombinationen, Anlagen und Datenpunkte ab. Die Unterlagen dienten als Grundlage für die Ausführung durch ein anderes Unternehmen. Bei einem Vergleich von fünf Offerten prüfte ich Vollständigkeit, Preise, Referenzen und Lösungsansätze. Fehlende Unterlagen forderte ich nach; auch eine energieeffizientere Variante floss in die Entscheidungsgrundlage für den Kunden ein.

# 1 Konzeptionierung

## 1.1 Themenfindung und Projektwahl

Zu Beginn standen drei mögliche Themen für die Diplomarbeit zur Auswahl. Eine Variante war die Bearbeitung eines realen Projekts bei der SCHERLER AG, bei welchem ich die Planung, Programmierung, Inbetriebnahme und Leitsystemintegration übernommen hätte. Aufgrund von Projektverzögerungen wäre innerhalb des Diplomarbeitszeitraums jedoch hauptsächlich die Vorbereitung und Programmierung möglich gewesen.

Als zweite Alternative wurde die Entwicklung eines automatisierten Datenpunktlisten-Erstellers mittels Programmcode beziehungsweise künstlicher Intelligenz betrachtet. Bei dieser Variante war mir der praktische Anteil jedoch zu gering.

Die Entscheidung fiel deshalb auf einen eigenen Gebäudeautomation-Testaufbau. Dieser bot neben der Programmierung und den Kommunikationsschnittstellen auch Arbeiten aus den Bereichen Elektroinstallation, Heizung/Kühlung, Schaltschrankbau und mechanischem Aufbau. Ursprünglich waren nur wenige Bussysteme und ein einfacher Aufbau vorgesehen. Während der Planung wurde das Konzept laufend erweitert.

## 1.2 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Die SCHERLER AG stellte für die Diplomarbeit die Beckhoff-Komponenten sowie verschiedene KNX-Komponenten zur Verfügung. Der eigentliche Testaufbau wurde von Grund auf neu erstellt. Die weiteren Komponenten und Materialien wurden von mir ausgewählt und beschafft.

Der Testaufbau soll nach Abschluss der Diplomarbeit bei der SCHERLER AG aufgestellt werden und vor allem für Lern- und Testzwecke eingesetzt werden. Zusätzlich kann er zur Ausbildung von Lernenden sowie für Demonstrationen gegenüber Kunden verwendet werden. Dies entspricht auch der ursprünglichen Themeneingabe, in welcher der Aufbau als Test- und Demonstrationssystem für typische Schnittstellen der Feld- und Automationsebene definiert wurde.

Meine Aufgaben umfassten:

- Planung und Konzeption des Testaufbaus
- Auswahl und Beschaffung der Komponenten
- mechanischer Aufbau und Verdrahtung
- Erstellung der technischen Schemata
- Projektierung der Bussysteme
- Programmierung der Beckhoff-SPS
- Erstellung der Visualisierungen
- Inbetriebnahme und Funktionsprüfung
- Enddokumentation

Für die Gestaltung und technische Umsetzung hatte ich weitgehend freie Hand.

## 1.3 Zielsetzung und Abgrenzung

Ziel der Diplomarbeit war die Planung, der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Gebäudeautomation-Testaufbaus. Dabei sollten verschiedene in der Gebäudeautomation verwendete Kommunikationssysteme und Feldgeräte miteinander verbunden und deren Funktion praxisnah demonstriert werden. Dieses Ziel wurde bereits in der Themeneingabe entsprechend definiert.

Wesentliche Ziele waren:

- Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen
- Ansteuerung verschiedener Feldgeräte
- Bedienung über KNX-Taster, KNX-Touchpanel und übergeordnetes Touchpanel
- Integration von KNX, DALI, BACnet/IP, MP-Bus, konventionellen I/O und eventuell Modbus
- Erstellung der erforderlichen technischen Dokumentation

Der Testaufbau stellt keine vollständige reale Heizungs- oder Kälteanlage dar. Eine echte Wärme- oder Kälteerzeugung ist nicht Bestandteil der Arbeit. Bereits im Pflichtenheft wurde festgelegt, dass hauptsächlich die Verteilung beziehungsweise Simulation dargestellt werden soll.

Eine automatische Regelung ist ebenfalls nicht Bestandteil des finalen Demonstrationsbetriebs. Der Schwerpunkt liegt auf Kommunikation, Bedienung, Ansteuerung und Rückmeldung der Geräte.

## 1.4 Projektorganisation und Ressourcen

Die Diplomarbeit wurde selbstständig durchgeführt. Planung, Materialauswahl, Aufbau, Verdrahtung, Programmierung, Parametrierung, Inbetriebnahme und Dokumentation lagen damit weitgehend in einer Hand. Fachliche Rückmeldungen, Tipps und Unterstützung erhielt ich vom Diplomdozenten und vom Firmenexperten. Für den Aufbau konnte ich vorhandene Werkzeuge und einzelne Komponenten nutzen. Die SCHERLER AG stellte die Beckhoff-Steuerung sowie verschiedene KNX-Komponenten zur Verfügung.

| **Beteiligter** | **Rolle / Funktion** | **Beitrag** |
|---|---|---|
| Dr. Lukas Kurmann | Diplomdozent TEKO | Fachliche Betreuung |
| Tobias Reinhardt | Fachexperte SCHERLER AG | Fachliche Betreuung |
| Marco Boccia | Diplomand | Planung, Umsetzung und Dokumentation |

Für die Umsetzung wurden folgende Ressourcen eingesetzt:

| Bereich | Komponenten | Verwendungszweck |
|---|---|---|
| Steuerung / CPU | Beckhoff CX8191, TwinCAT 3.1 Build 4024.75, Netzteil 24VDC | Zentrale SPS, Software, WebVisu und Kommunikation sowie BACnet-Fähigkeit |
| K-Bus / Karten | KL1809, KL2809, KL3208-0010, KL3204, KL4004, KL6301, KL6771, KL6041, KL9010 | Digitale/analoge I/O sowie KNX, MP-Bus und Modbus RTU |
| KNX / DALI | KNX-Netzteil, Taster, KNX-Touchpanel, KNX/DALI-Gateway, DALI-EVG | Raumbedienung und Beleuchtung |
| BACnet/IP | Siemens N143 KNX/BACnet-Gateway, Ethernet-Netzwerk | Kopplung KNX-Touchpanel mit der Beckhoff-SPS via BACnet |
| HLK | Belimo LR24A-MP, Modbus Stellantrieb, 0–10-V Stellantriebe, Pumpen, Durchflussmelder, Netzteil 12VDC, verschiedene Hydraulikkomponente | Heiz-/Kühlumschaltung und Raumventile |
| Engineering | ETS 6, eXs 2025, Microsoft Visio, Word/Excel | Projektierung, Schemas und Dokumentation |
| Mess- und Hilfsmittel | Notebook, Multimeter, ETS-Gruppenmonitor, Hersteller-Tools | Inbetriebnahme, Diagnose und Funktionskontrolle |
| Montagematerial | Holz, Verrohrung, Schellen, Adapter, Kanäle, Kabel, Drähte, Steckdosen, Abzweigdosen, Kleinmaterial, inkl. diverser Montagewerkzeugen | Gesamter Aufbau |

Für die Programmierung und Parametrierung wurden neben TwinCAT 3 die KNX-Engineering-Software ETS 6 sowie die benötigten Herstellerbibliotheken und Tools eingesetzt. Das Elektroschema wurde mit eXs 2025 erstellt. Für Prinzipschemata und grafische Darstellungen kam Microsoft Visio zum Einsatz. Bei der Inbetriebnahme wurden zusätzlich Herstellerwerkzeuge genutzt, beispielsweise zur Prüfung des TA-Sliders und für die Diagnose einzelner Kommunikationswege.

Die von mir getragenen Kosten für Komponenten und Materialien beliefen sich auf rund CHF 4'100. Bereits vorhandene und von der SCHERLER AG zur Verfügung gestellte Komponenten, Werkzeuge und Tools sind darin nicht berücksichtigt.

| Anzahl | Gerät | Preis | Total |
|---|---|---|---|
| 9 | Temperaturfühler | 10 | 90 |
| 1 | PC-Touchpanel | 350 | 350 |
| 1 | KNX-Touchpanel | 500 | 500 |
| 3 | Pumpe | 25 | 75 |
| 1 | MP-BusStellantrieb und Ventil | 500 | 500 |
| 1 | Heizverteiler | 100 | 100 |
| 3 | LED's + EVG's | 50 | 150 |
| 6 | Lämpchen | 4 | 24 |
| 3 | Taster | 25 | 75 |
| 3 | 0-10V Stellantriebe | 60 | 180 |
| 1 | KNX Speisung | 200 | 200 |
| 1 | KNX/DALI Gateway | 500 | 500 |
| 1 | KNX/BACnet Gateway | 500 | 500 |
| 2 | Relais | 20 | 40 |
| 100 | Reihenklemmen | 1 | 100 |
| 1 | Kanäle | 50 | 50 |
| 1 | Schienen | 50 | 50 |
| 1 | Kabel | 150 | 150 |
| 1 | Holzmaterial | 150 | 150 |
| 1 | Kleinmaterial | 300 | 300 |
| | | TOTAL ca. | 4084 CHF |

*Abbildung 1: Einkaufsliste*

## 1.5 Termin- und Stundenplanung

Für die Diplomarbeit war ein Arbeitsumfang von 240 Stunden vorgesehen. Zu Projektbeginn wurde ein erster Terminplan erstellt, in welchem die Arbeiten grob in Recherche und Materialbeschaffung, technische Dokumentation, Softwareerstellung, Zusammenbau, Inbetriebnahme und Abschlussdokumentation unterteilt wurden.

| AUFGABE | FORTSCHRITT | START | ENDE |
|---|---|---|---|
| **Diplomarbeit** | | | |
| Vorarbeit: Erstellung Pflichtenheft | 100% | 13.07.2026 | 03.08.2026 |
| DA Start: Recherche und Materialbestellung | 100% | 04.08.2026 | 09.08.2026 |
| Erstellung technischer Unterlagen | 100% | 10.08.2026 | 16.08.2026 |
| Erstellung der Software | 100% | 17.08.2026 | 23.08.2026 |
| Zusammenbau | 100% | 24.08.2026 | 30.08.2026 |
| Inbetriebnahme und Dokumentation | 100% | 31.08.2026 | 03.09.2026 |
| Nachgehen der Kann-Ziele (2/3) | 100% | 04.09.2026 | 13.09.2026 |
| Optimierungen | 100% | 14.09.2026 | 20.09.2026 |
| Fertigstellung der Dokumentation | 100% | 21.09.2026 | 27.09.2026 |

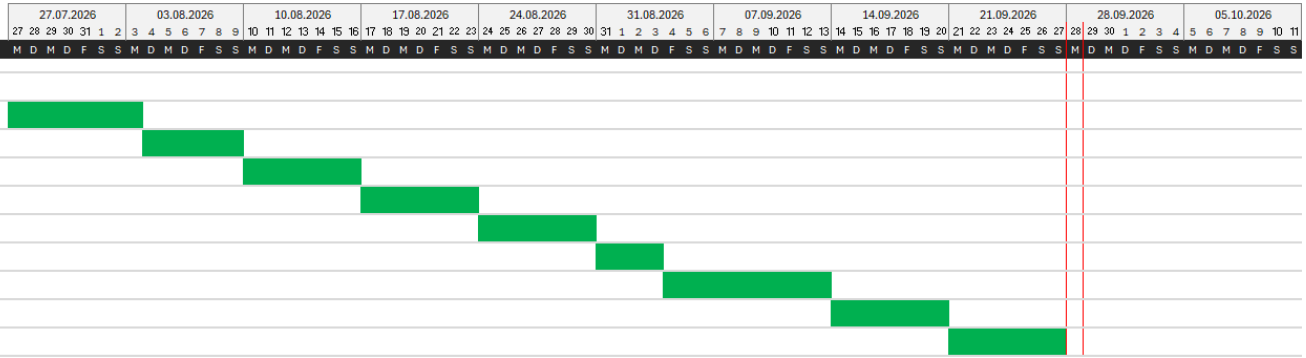



*Abbildung 2: Ursprünglicher Terminplan mit Arbeitspaketen*

Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, dass der geplante Ablauf angepasst werden musste. Insbesondere der mechanische Aufbau, die Materialbeschaffung, die Montage und Verdrahtung sowie die Erstellung der technischen Unterlagen beanspruchten mehr Zeit als ursprünglich angenommen. Deshalb wurde der Terminplan während des Projekts detaillierter aufgebaut und an den tatsächlichen Projektstand angepasst.

| AUFGABE | FORTSCHRITT | START | ENDE |
|---|---|---|---|
| **Anfang Diplomarbeit** | | | |
| Vorarbeit: Erstellung Pflichtenheft | 100% | 13.07.2026 | 03.08.2026 |
| DA Start: Recherche und Materialbestellung | 100% | 04.08.2026 | 09.08.2026 |
| Funktionskontrollen Materialen | 100% | 04.08.2026 | 09.08.2026 |
| Erstellung technischer Unterlagen Teil 1 (Abendarbeit) | 100% | 04.08.2026 | 31.08.2026 |
| Erstellung technischer Unterlagen Teil 2 (Abendarbeit) | 100% | 01.09.2026 | 28.09.2026 |
| Abklärung Sanitärmaterial | 100% | 24.08.2026 | 10.09.2026 |
| **Werkstattsarbeit** | | | |
| Fehlendes Material bestellen / holen | 100% | 24.08.2026 | 10.09.2026 |
| Wand Zusammenaufbau Holz | 100% | 24.08.2026 | 31.08.2026 |
| Wand Malen | 100% | 24.08.2026 | 31.08.2026 |
| Montage Feldgeräte | 100% | 31.08.2026 | 10.09.2026 |
| Nachgehen der Kann-Ziele (2/3) | 100% | 04.09.2026 | 13.09.2026 |
| Montage Elektromaterial | 100% | 31.08.2026 | 11.09.2026 |
| Verdrahtung | 100% | 11.09.2026 | 13.09.2026 |
| **Büroarbeit** | | | |
| Erstellung Schema | 100% | 10.09.2026 | 11.09.2026 |
| Erstellung Prinzipschema | 100% | 07.09.2026 | 08.09.2026 |
| Erstellung FuBe | 100% | 07.09.2026 | 13.09.2026 |
| Erstellung Systemtopologie | 100% | 07.09.2026 | 13.09.2026 |
| Erstellung DP-Liste | 100% | 14.09.2026 | 14.09.2026 |
| Softwares schreiben | 100% | 14.09.2026 | 20.09.2026 |
| Inbetriebnahme und Protokoll | 100% | 21.09.2026 | 21.09.2026 |
| Erster Anfang Dokumentation | 100% | 01.09.2026 | 13.09.2026 |
| Vervollständigung Qualifikationsprofil | 100% | 21.09.2026 | 29.09.2026 |
| Fertigstellung der Dokumentation | 100% | 21.09.2026 | 29.09.2026 |
| Abgabe | 100% | 29.09.2026 | 29.09.2026 |

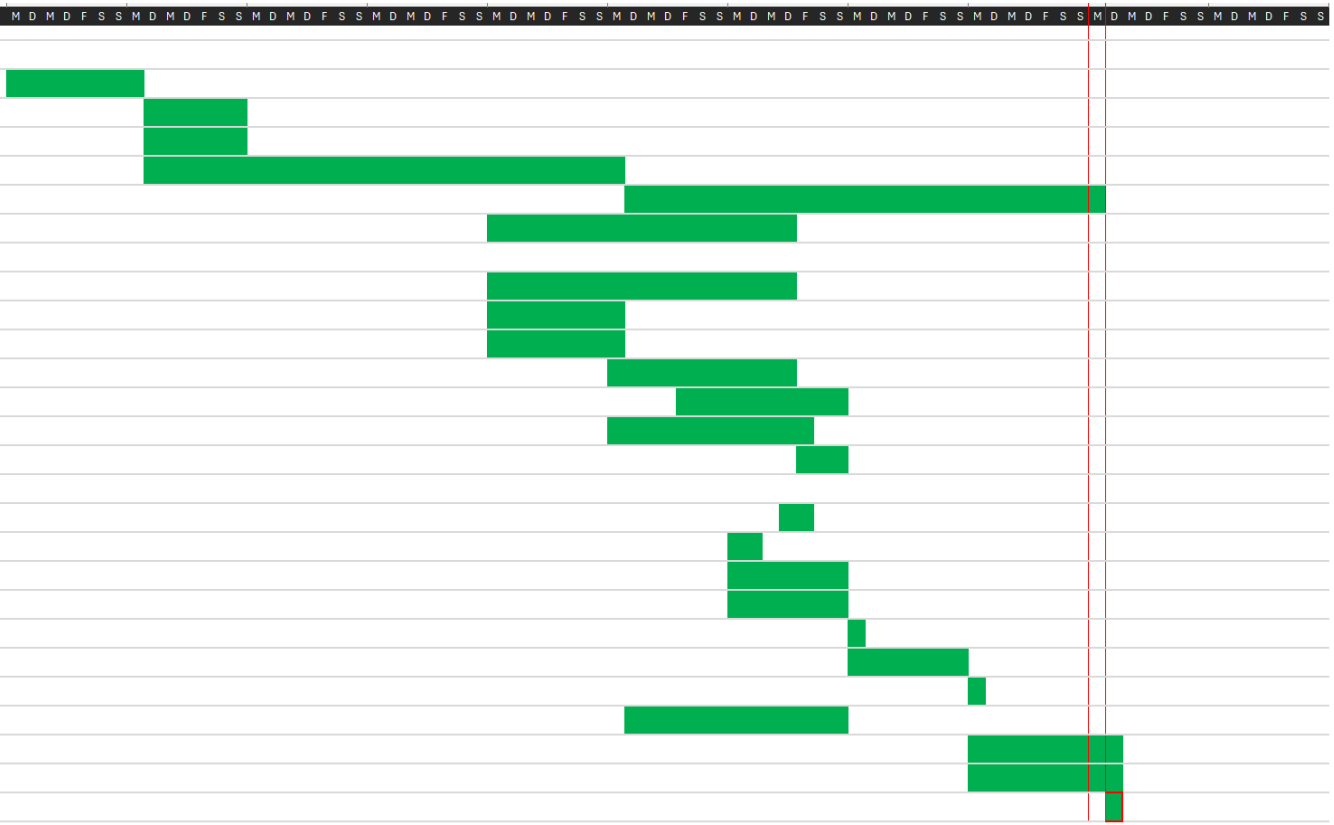


*Abbildung 3: Angepasster Terminplan und Arbeitspakete*

## 1.6 Tatsächlicher Projektverlauf

Gegen Ende der Diplomarbeit musste der Terminplan nochmals überarbeitet werden. Zusätzliche Montagearbeiten, Lieferverzögerungen, defekte Komponenten und ein höherer Softwareaufwand verschoben mehrere Arbeitspakete. Viele Aufgaben mussten parallel bearbeitet werden. Um den Aufwand nachvollziehen zu können, hielt ich die geleisteten Stunden täglich fest und fasste die Tätigkeiten stichwortartig zusammen. Insgesamt lag der Aufwand deutlich über 400 Stunden.

| AUFGABE | FORTSCHRITT | START | ENDE |
|---|---|---|---|
| **Anfang Diplomarbeit** | | | |
| Vorarbeit: Erstellung Pflichtenheft | 100% | 13.07.2026 | 03.08.2026 |
| DA Start: Recherche und Materialbestellung | 100% | 04.08.2026 | 19.09.2026 |
| Funktionskontrollen Materialen | 100% | 04.08.2026 | 19.09.2026 |
| Erstellung technischer Unterlagen (Abendarbeit) | 100% | 04.08.2026 | 29.09.2026 |
| Abklärung Sanitärmaterial | 100% | 24.08.2026 | 30.08.2026 |
| **Werkstattsarbeit** | | | |
| Fehlendes Material bestellen / holen | 100% | 24.08.2026 | 10.09.2026 |
| Wand Zusammenaufbau Holz | 100% | 24.08.2026 | 31.08.2026 |
| Wand Malen | 100% | 24.08.2026 | 31.08.2026 |
| Montage Feldgeräte | 100% | 31.08.2026 | 21.09.2026 |
| Nachgehen der Kann-Ziele | 100% | 04.09.2026 | 24.09.2026 |
| Montage Elektromaterial | 100% | 31.08.2026 | 20.09.2026 |
| Verdrahtung | 100% | 11.09.2026 | 20.09.2026 |
| **Büroarbeit** | | | |
| Elektroschema | 100% | 13.08.2026 | 27.09.2026 |
| Prinzipschema | 100% | 07.09.2026 | 08.09.2026 |
| Funktionsbeschrieb | 100% | 07.09.2026 | 13.09.2026 |
| Systemtopologie | 100% | 07.09.2026 | 13.09.2026 |
| Erstellung DP-Liste | 100% | 14.09.2026 | 16.09.2026 |
| Softwares schreiben | 100% | 14.09.2026 | 24.09.2026 |
| Inbetriebnahme und Protokoll | 100% | 24.09.2026 | 24.09.2026 |
| Erster Anfang Dokumentation | 100% | 01.09.2026 | 13.09.2026 |
| Qualifikationsprofil | 100% | 21.09.2026 | 28.09.2026 |
| Fertigstellung der Dokumentation | 100% | 25.09.2026 | 29.09.2026 |
| Abgabe | 100% | 29.09.2026 | 29.09.2026 |

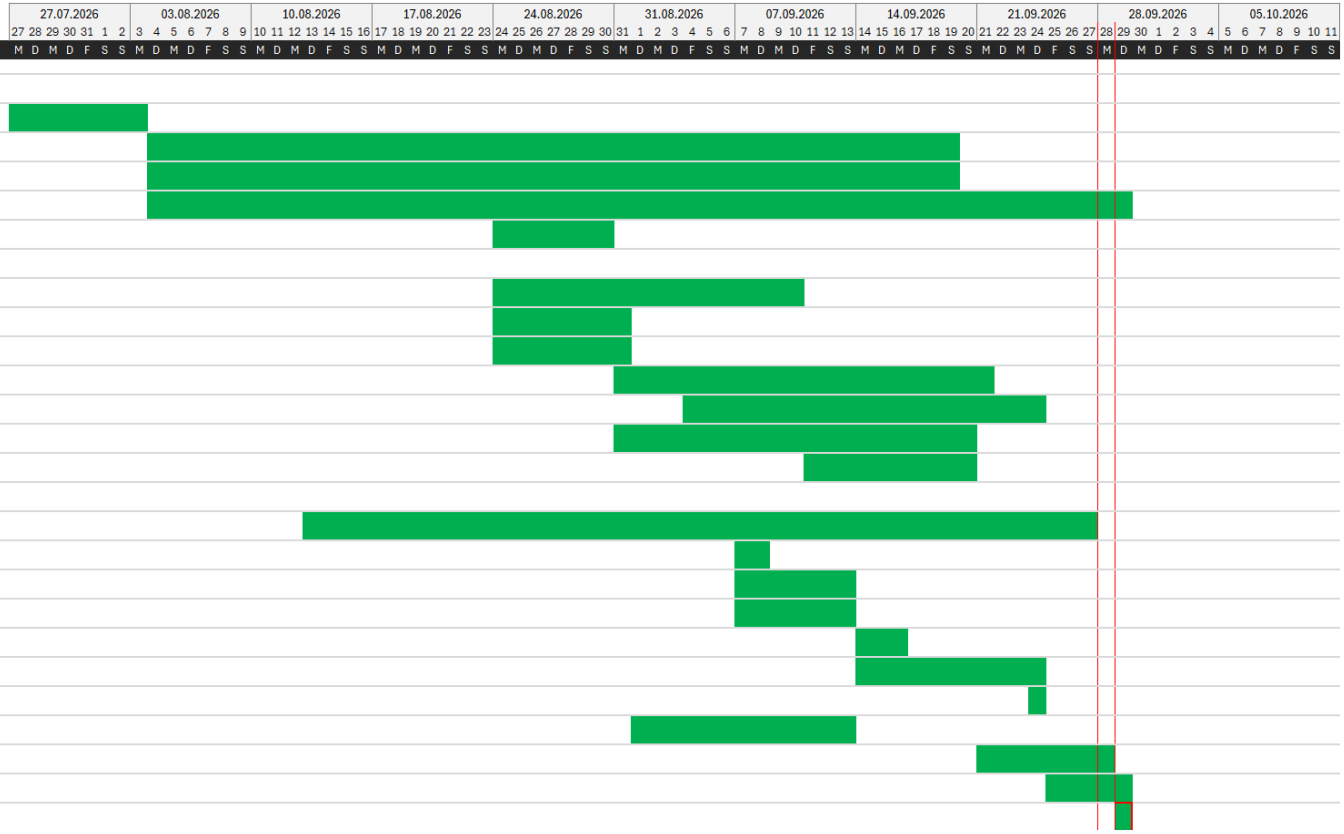



*Abbildung 4: Tatsächlicher Projektverlauf mit Arbeitspaketen*

# 2 Lösung der Aufgabe

## 2.1 Gesamtsystem und Systemarchitektur

Im ersten ausgearbeiteten Systemkonzept waren die wesentlichen Kommunikationssysteme und Geräte festgelegt. Der Schwerpunkt lag auf der Ansteuerung einzelner Feldgeräte und der Einbindung ausgewählter Schnittstellen. Die folgende Darstellung zeigt diesen frühen Planungsstand.

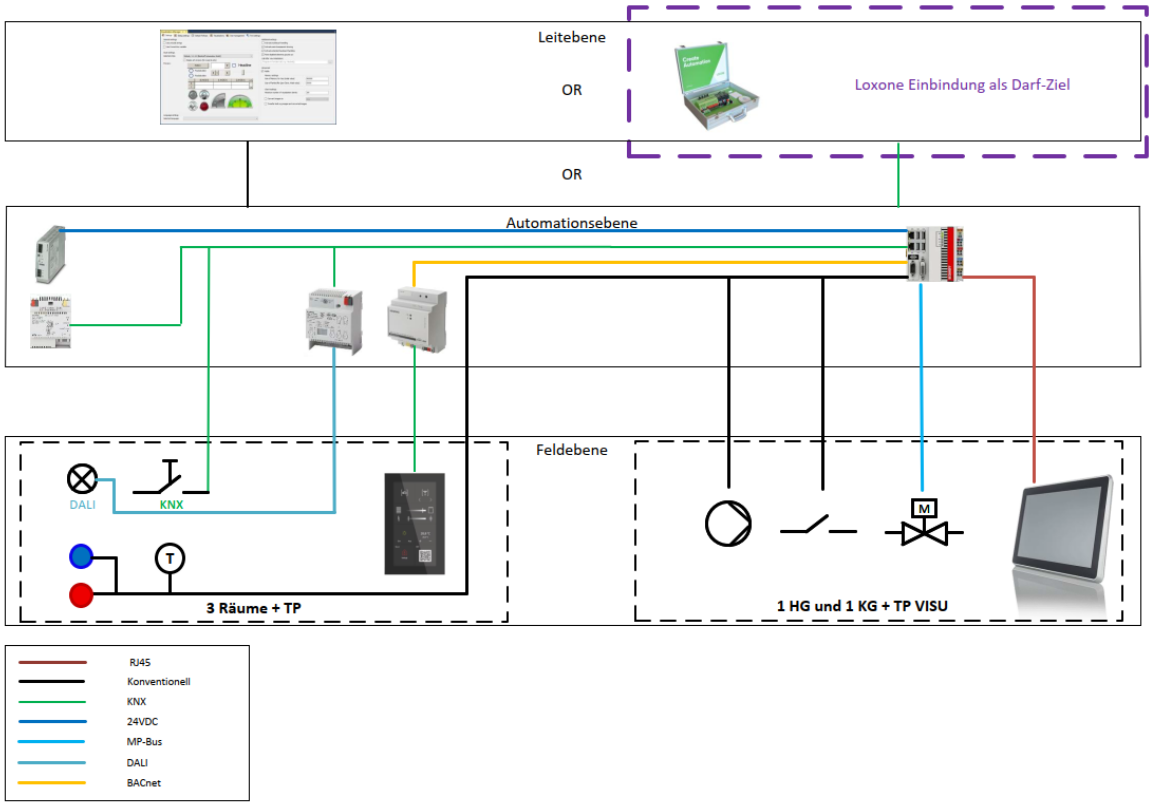



*Abbildung 5: Erstes ausgearbeitetes Systemkonzept*

Im Verlauf der Planung wurde der Aufbau schrittweise erweitert. Zusätzliche Kommunikationssysteme und Feldgeräte wurden integriert. Die folgende Systemtopologie zeigt den final umgesetzten Aufbau und bildet die Grundlage für die weiteren Kapitel.

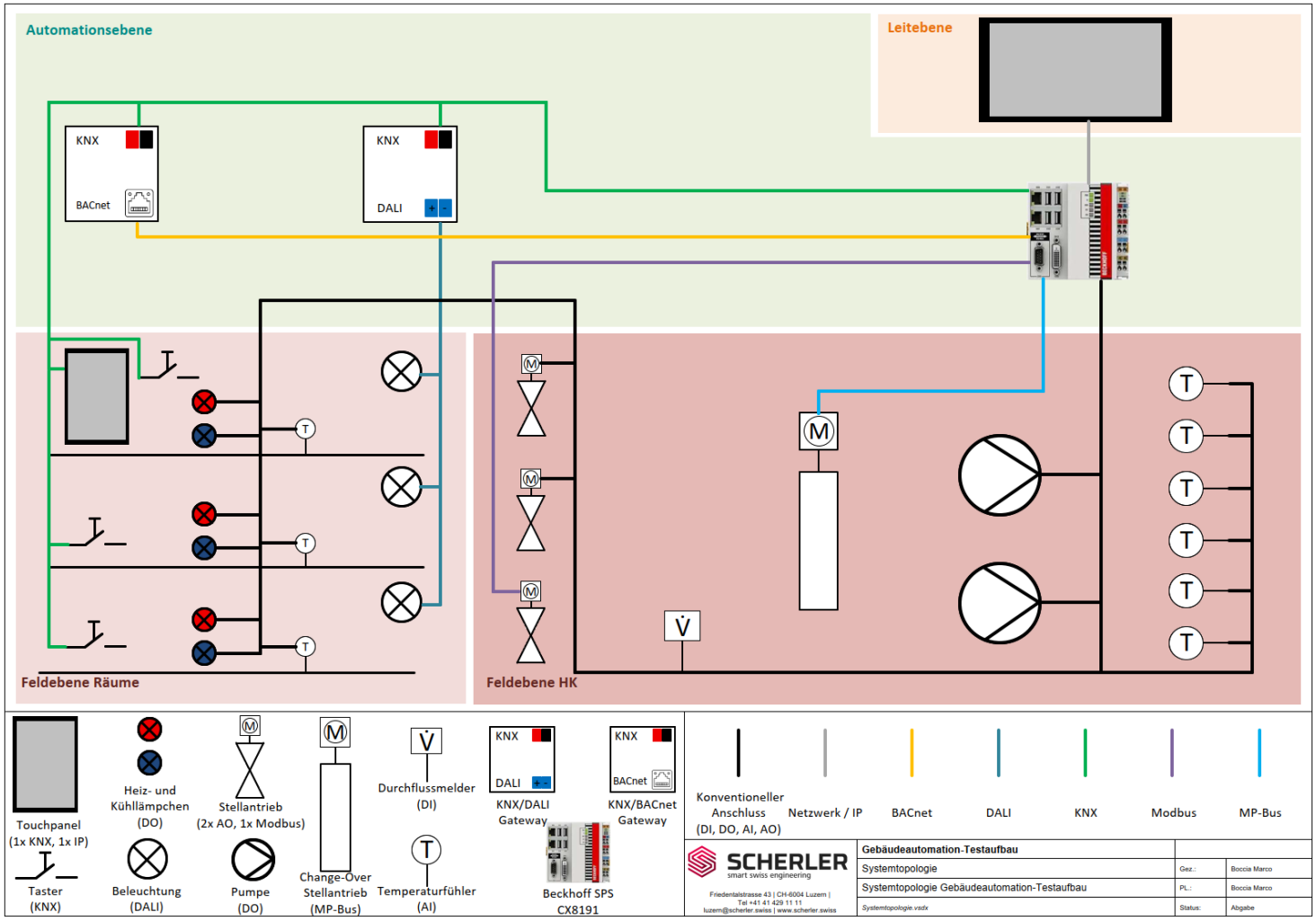
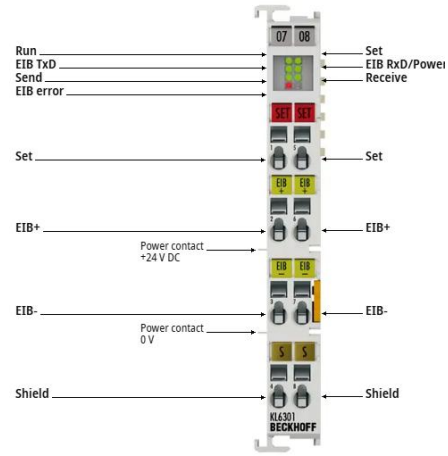



*Abbildung 6: Finale Systemtopologie*

## 2.2 KNX und DALI

KNX wird im Testaufbau für die lokale Raum- und Lichtbedienung eingesetzt. Jeder der drei Räume verfügt über einen KNX-Taster. Zusätzlich ist ein KNX-Touchpanel vorhanden, über welches die Beleuchtung sowie die Betriebsarten der drei Räume bedient und Statusinformationen angezeigt werden können. Die Beckhoff CX8191 ist über die KNX-Klemme KL6301 mit dem KNX-System verbunden.

Für die Beleuchtung der drei Räume wird DALI eingesetzt. Jeder Raum besitzt eine separat schalt- und dimmbare LED-Beleuchtung. Die Verbindung zwischen KNX und DALI erfolgt über ein KNX/DALI-Gateway. Dadurch können die Lichtbefehle aus dem KNX-System auf die DALI-Beleuchtung übertragen werden. KNX und DALI bilden somit gemeinsam die Raumbeleuchtung des Testaufbaus.



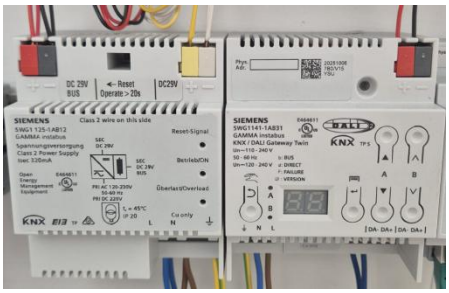



*Abbildung 7: KNX-Komponenten des Testaufbaus*

## 2.3 BACnet/IP und Ethernet-Netzwerk

BACnet/IP wird im Testaufbau für den Datenaustausch zwischen dem KNX/BACnet-Gateway und der Beckhoff CX8191 verwendet. Ausgewählte Datenpunkte des KNX-Touchpanels werden im Gateway auf BACnet-Objekte umgesetzt und anschliessend über Ethernet an die SPS übertragen. Dadurch können insbesondere Raumbetriebsarten und Statuswerte zwischen dem KNX-Touchpanel und der Beckhoff-Steuerung ausgetauscht werden.

Das Ethernet-Netzwerk wird zusätzlich für die übergeordnete WebVisualisierung eingesetzt. Das übergeordnete Touchpanel greift direkt auf die TwinCAT-WebVisu der CX8191 zu und dient als zentrale Bedien- und Beobachtungsebene.

Die Kommunikation der WebVisu und die BACnet/IP-Verbindung sind dabei getrennt aufgebaut. Die WebVisu kommuniziert direkt mit der CX8191, während die BACnet/IP-Verbindung über das KNX/BACnet-Gateway erfolgt.

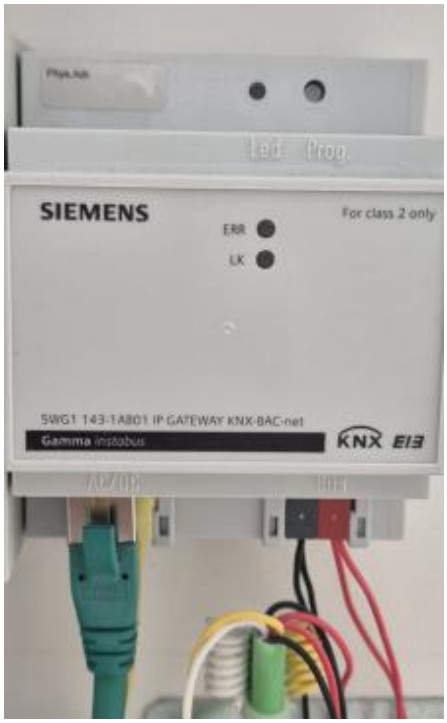



*Abbildung 8: KNX/BACnet-Gateway*

## 2.4 MP-Bus und Modbus RTU

Der MP-Bus wird im Testaufbau für die Ansteuerung des Change-Over-Antriebs eingesetzt. Der Belimo LR24A-MP ist über die Beckhoff-Klemme KL6771 mit der CX8191 verbunden. Die SPS kann dem Antrieb eine Sollposition vorgeben und gleichzeitig die aktuelle Position zurücklesen. Dadurch lässt sich die Stellung des Change-over-Ventils über den Bus überwachen und ansteuern.

Modbus RTU wird für einen weiteren Stellantrieb eingesetzt. Der TA-Slider ist über die Beckhoff-Klemme KL6041 seriell mit der SPS verbunden. Der Stellwert wird über Modbus übertragen und dient im Testaufbau zur Demonstration der Kommunikation mit einem seriell angebundenen Feldgerät.



*Abbildung 9: MP-Bus-Antrieb (hellblau) und Modbus-Antrieb (dunkelblau)*

Mit MP-Bus und Modbus RTU werden damit zwei unterschiedliche serielle Kommunikationssysteme innerhalb desselben Testaufbaus verwendet. Beide Schnittstellen zeigen, wie Feldgeräte direkt über Bussysteme an die zentrale Steuerung angebunden werden können.

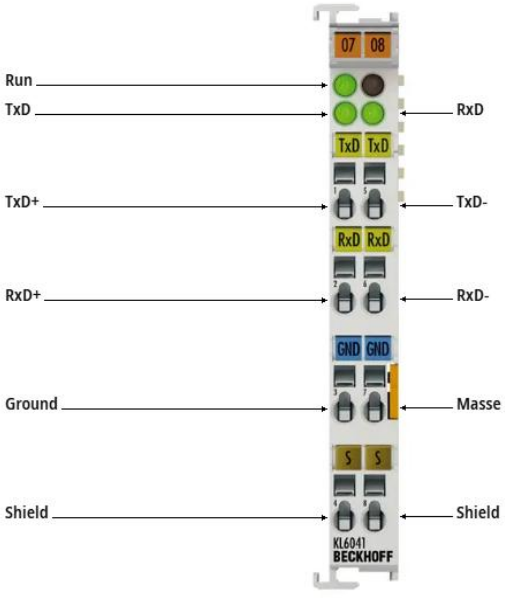



*Abbildung 11: Beckhoff-Klemme für Modbus RTU*

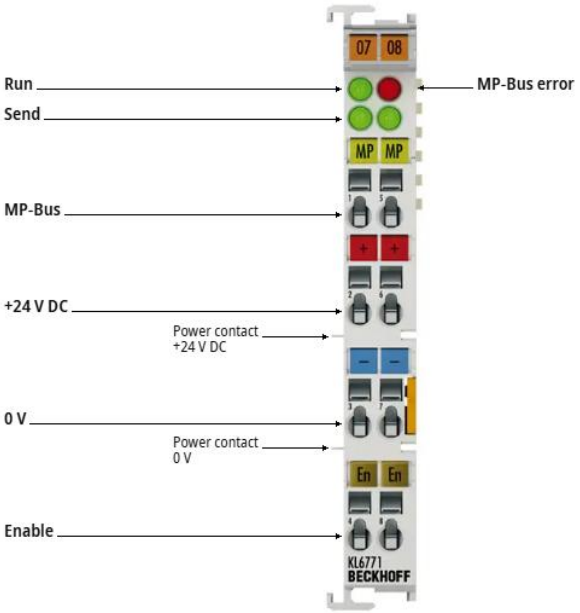



*Abbildung 10: Beckhoff-Klemme für MP-Bus*

## 2.5 Beckhoff SPS und konventionelle I/O

Die Beckhoff CX8191 bildet die zentrale Steuerung des Testaufbaus. Sie verarbeitet die Bedienbefehle, Statusinformationen und Handvorgaben und verbindet die verschiedenen Kommunikationssysteme über die eingesetzten Beckhoff-Klemmen. Zusätzlich stellt sie die WebVisualisierung für das übergeordnete Touchpanel bereit.

Neben den Bussystemen werden auch konventionelle digitale und analoge Ein- und Ausgänge verwendet. Dazu gehören unter anderem der Durchflussmelder, die Pumpen, die Betriebsanzeigen, die PT1000-Temperaturfühler sowie die 0–10-V-Stellantriebe.

Die einzelnen Signale werden über die entsprechenden K-Bus-Klemmen eingelesen oder ausgegeben. Dadurch können innerhalb des Testaufbaus sowohl klassische I/O-Signale als auch verschiedene Bussysteme gemeinsam verarbeitet werden.

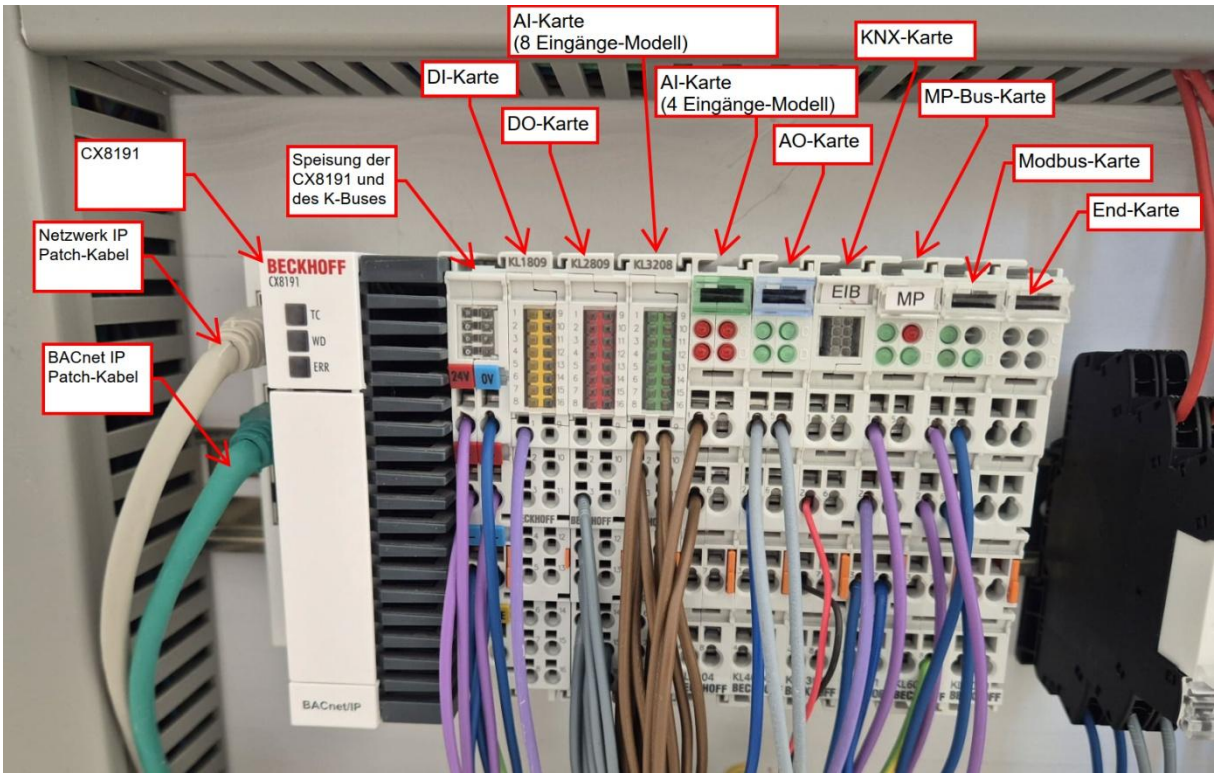



*Abbildung 12: Beckhoff CX8191 mit K-Bus-Klemmen*

## 2.6 Heiz-/Kühlkonzept und Räume

Der Testaufbau stellt drei Räume sowie eine gemeinsame Heiz- und Kühlverteilung dar. Jeder Raum verfügt über eine Beleuchtung, eine Temperaturerfassung, eine rote und blaue Betriebsanzeige sowie einen Stellantrieb. Die Raumtemperaturen werden im finalen Demonstrationsbetrieb angezeigt, jedoch nicht für eine automatische Regelung verwendet.

Die Heiz-/Kühlgruppe besteht aus einem Heiz- und einem Kühltank, jeweils einer Pumpe, einem Change-Over-Ventil, einem Fussbodenheizverteiler mit drei Stellantrieben sowie einem gemeinsamen Durchflussmelder. Je nach gewähltem Raumbetriebsmodus kann ein Heiz- oder Kühlwunsch vorgegeben und die entsprechende Richtung der Anlage angesteuert werden.

Im finalen Aufbau stehen dabei die Ansteuerung und Darstellung der Komponenten im Vordergrund. Eine vollständige automatische Raumtemperatur- oder hydraulische Regelung ist nicht Bestandteil des Demonstrationsbetriebs.

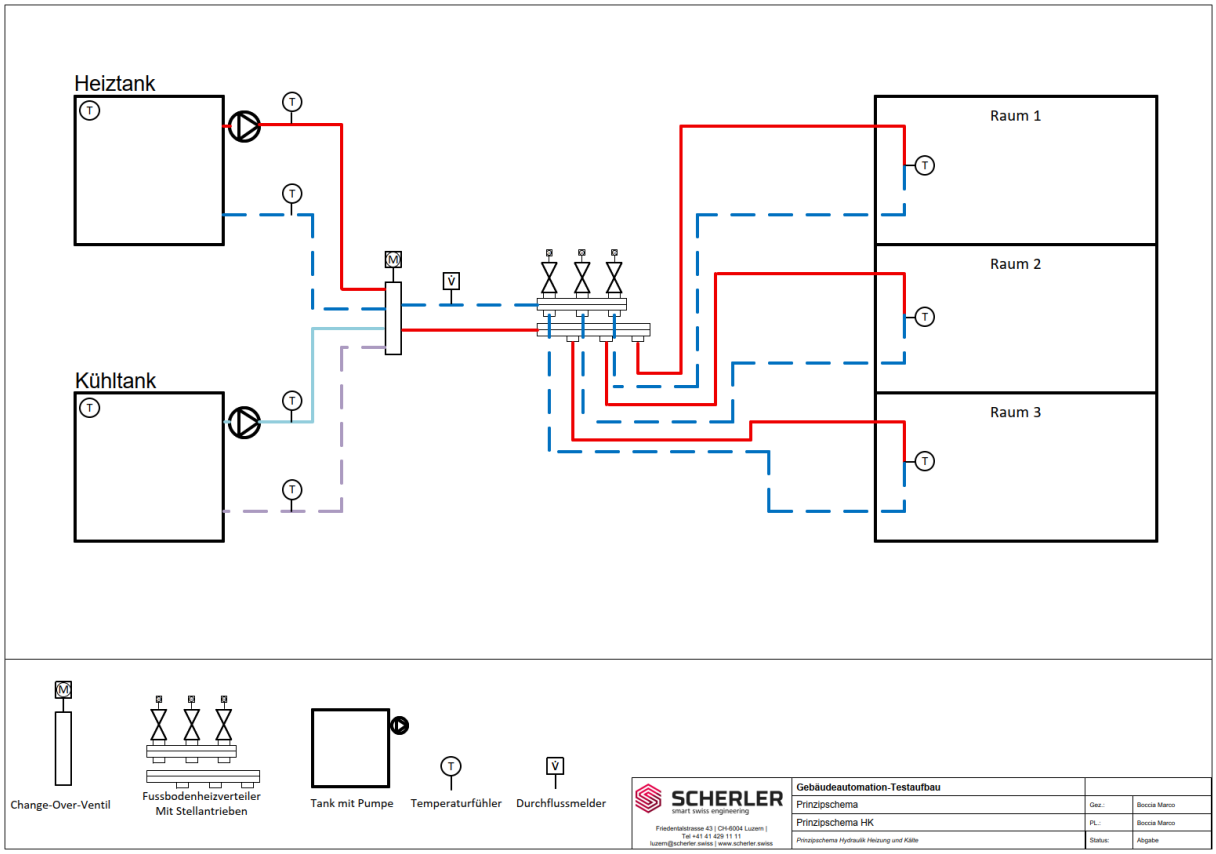



*Abbildung 13: Hydraulisches Prinzipschema*

## 2.7 Bedien- und Prioritätskonzept

Für den Testaufbau stehen drei Bedienebenen zur Verfügung: die KNX-Taster, das KNX-Touchpanel und das übergeordnete WebVisu-Touchpanel. Die Bedienebenen übernehmen unterschiedliche Aufgaben und besitzen unterschiedliche Prioritäten.

Die KNX-Taster dienen der lokalen Bedienung der Beleuchtung. Das KNX-Touchpanel ermöglicht zusätzlich die Bedienung der Beleuchtung sowie der Raumbetriebsarten. Das übergeordnete Touchpanel greift über Ethernet direkt auf die TwinCAT-WebVisualisierung der CX8191 zu und ermöglicht die zentrale Bedienung des gesamten Testaufbaus.

Das übergeordnete Touchpanel besitzt die höchste Bedienpriorität. Sobald über die WebVisu ein Handbefehl ausgeführt wird, werden die Bedienbefehle des KNX-Touchpanels und der KNX-Taster gesperrt. Status- und Rückmeldedaten bleiben weiterhin sichtbar. Mit der Funktion «Alles Auto» werden die Handvorgaben wieder aufgehoben und die normale KNX-Bedienung freigegeben. Dabei werden keine festen Standardwerte gesetzt, sondern die zuvor gültigen Werte der normalen Bedienebene wieder verwendet.

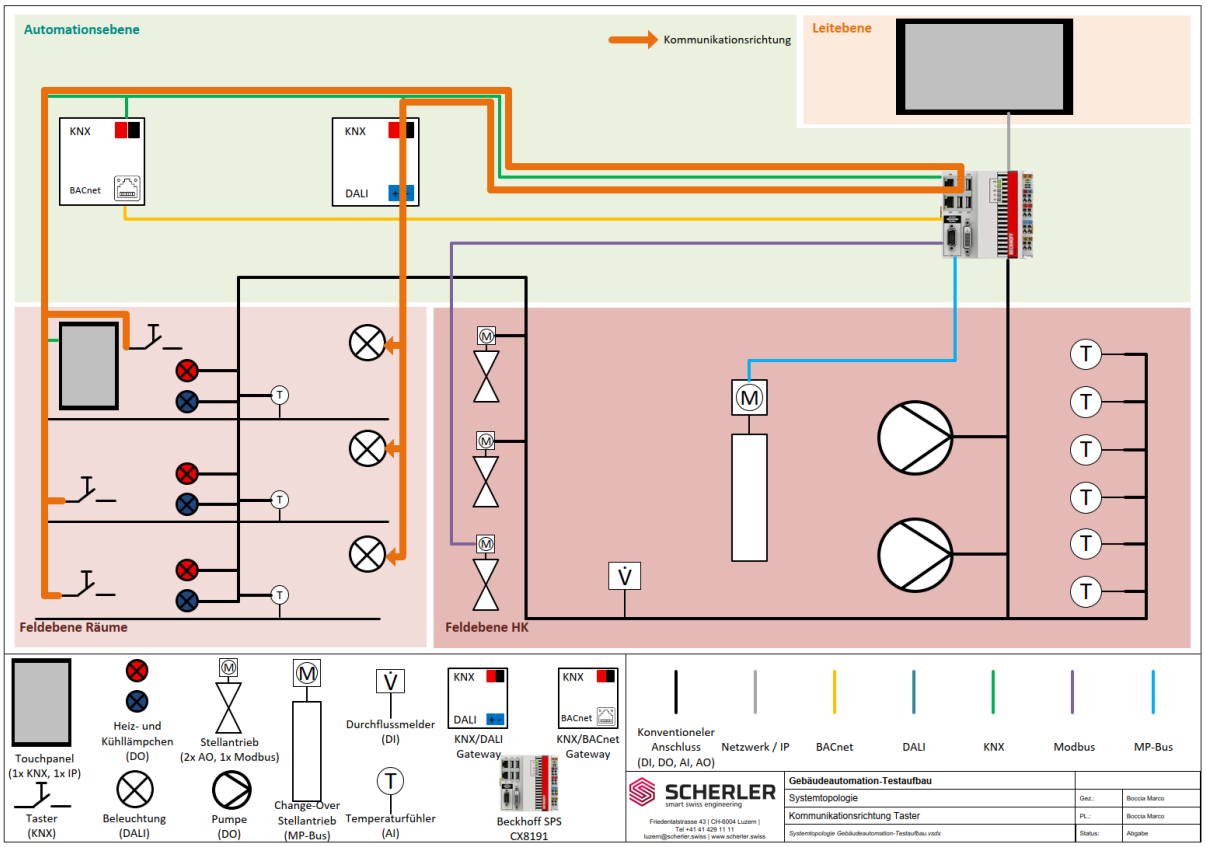



*Abbildung 14: Kommunikationsweg der KNX-Taster*

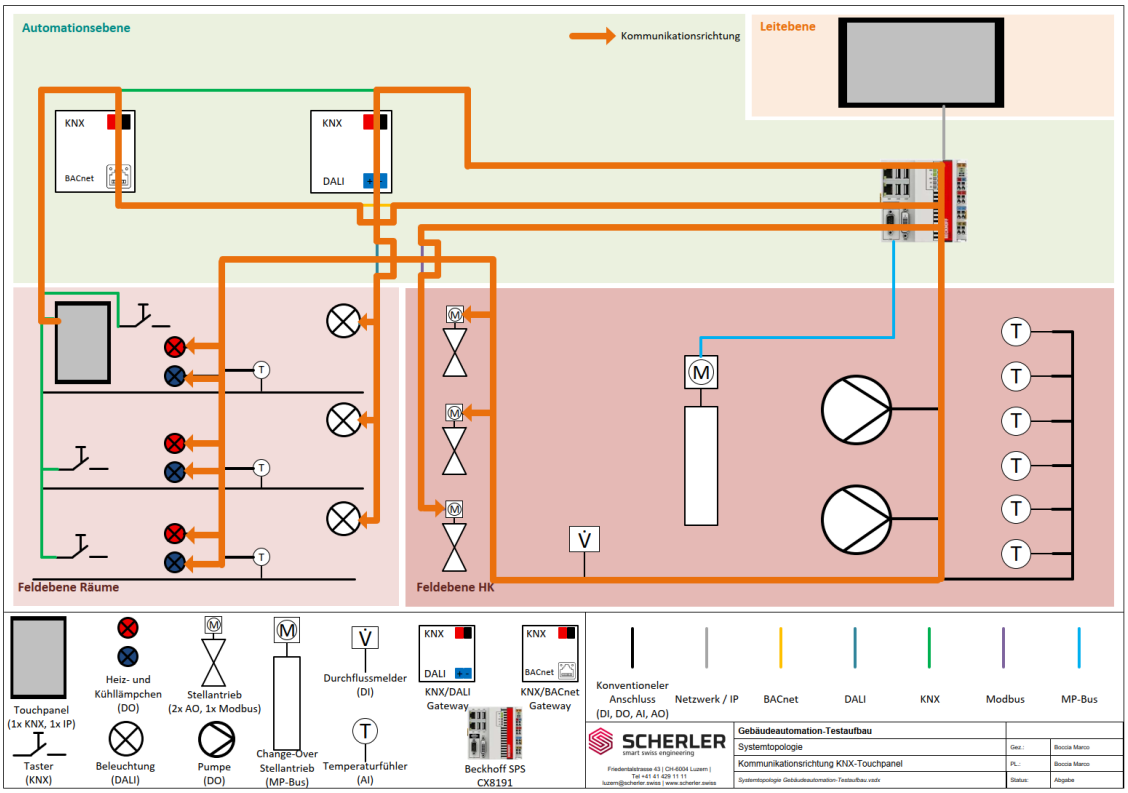



*Abbildung 15: Kommunikationsweg des KNX-Touchpanels*

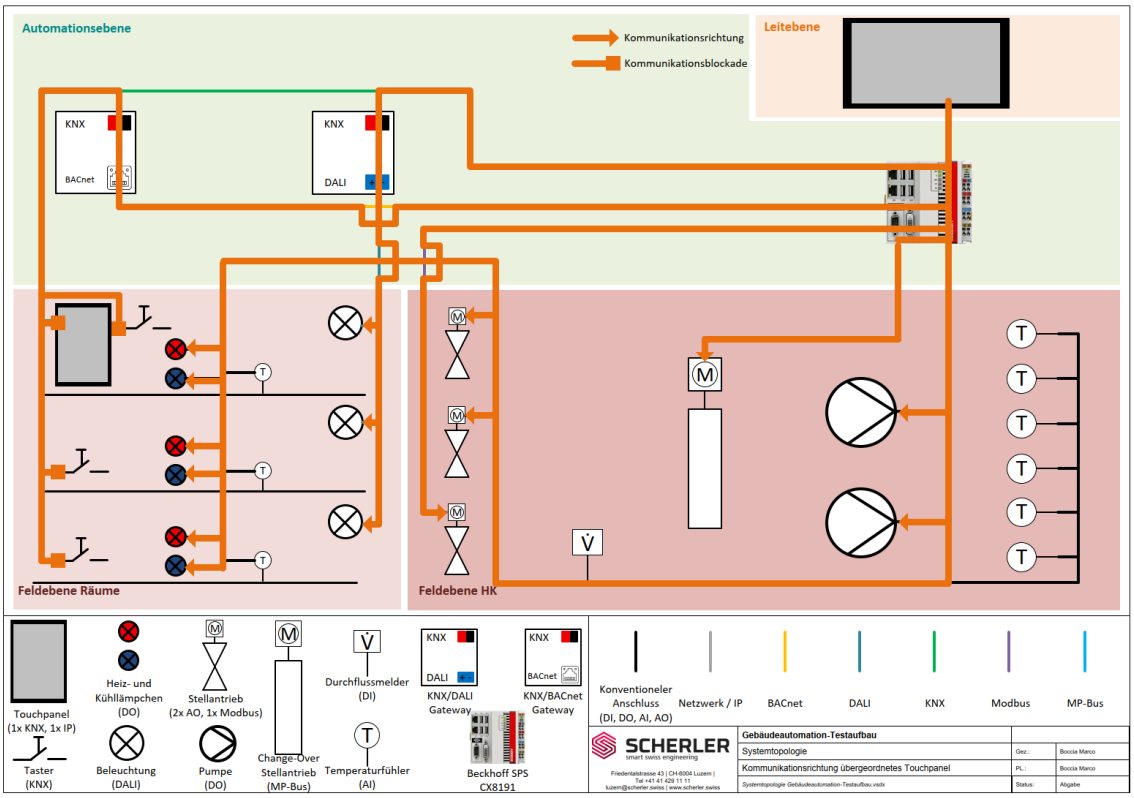



*Abbildung 16: Kommunikationsweg des übergeordneten Touchpanels*

# 3 Planung und Realisierung

## 3.1 Aufbau

Bevor mit dem eigentlichen Holzaufbau begonnen wurde, erstellte ich zunächst eine provisorische Anordnung auf einem Stück Floorliner. Darauf zeichnete ich die geplanten Positionen der Komponenten ein.

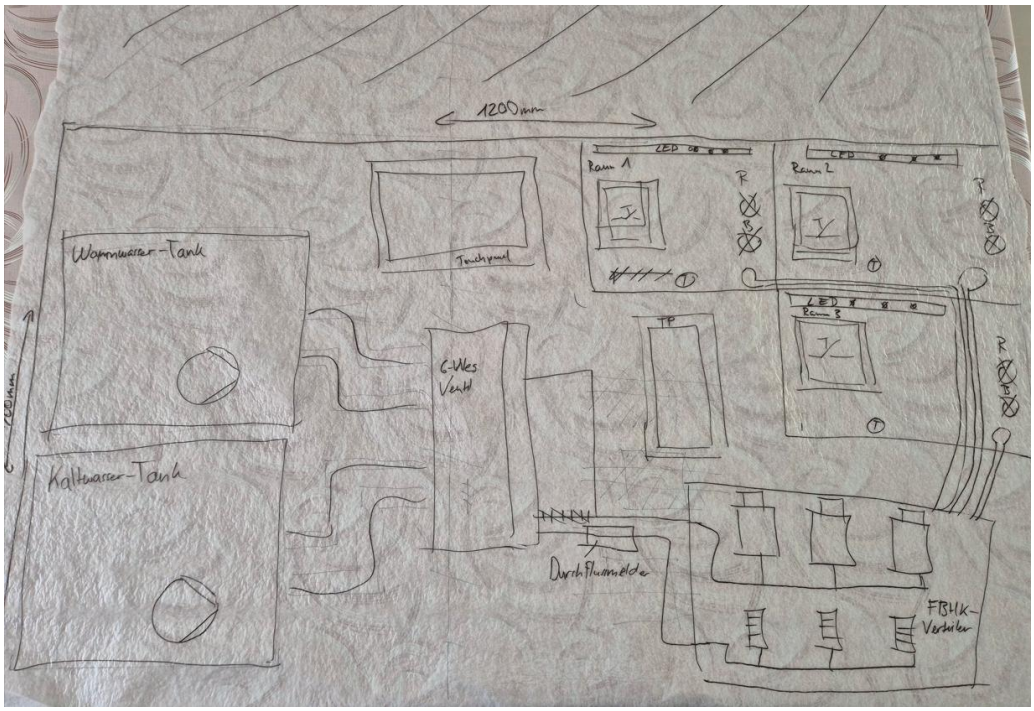



*Abbildung 17: Erste Layoutskizze auf Floorliner*

Sobald erste Bauteile geliefert wurden, platzierte ich diese probeweise auf der Fläche, um die gewählten Abmessungen und die vorgesehene Anordnung zu überprüfen.

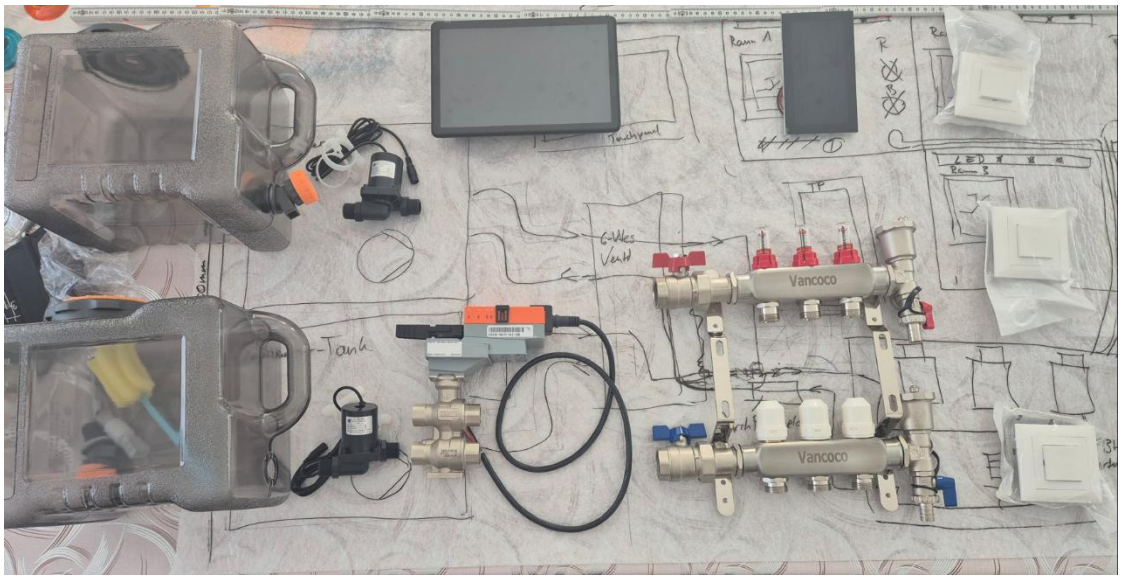



*Abbildung 18: Probeplatzierung der Komponenten zur Prüfung der Abmessungen*

Für den Aufbau wurden verschiedene Holzplatten beschafft, zugeschnitten und anschliessend geschliffen. Zuerst entstanden die drei Raumkörper. Da das Holz beim direkten Verschrauben beschädigt oder ausbrechen konnte, wurden die Schraubstellen jeweils vorgebohrt. Nach dem Zusammenbau wurden die Räume auf der grossen Grundplatte mit den Abmessungen von 1400 × 700 mm montiert.

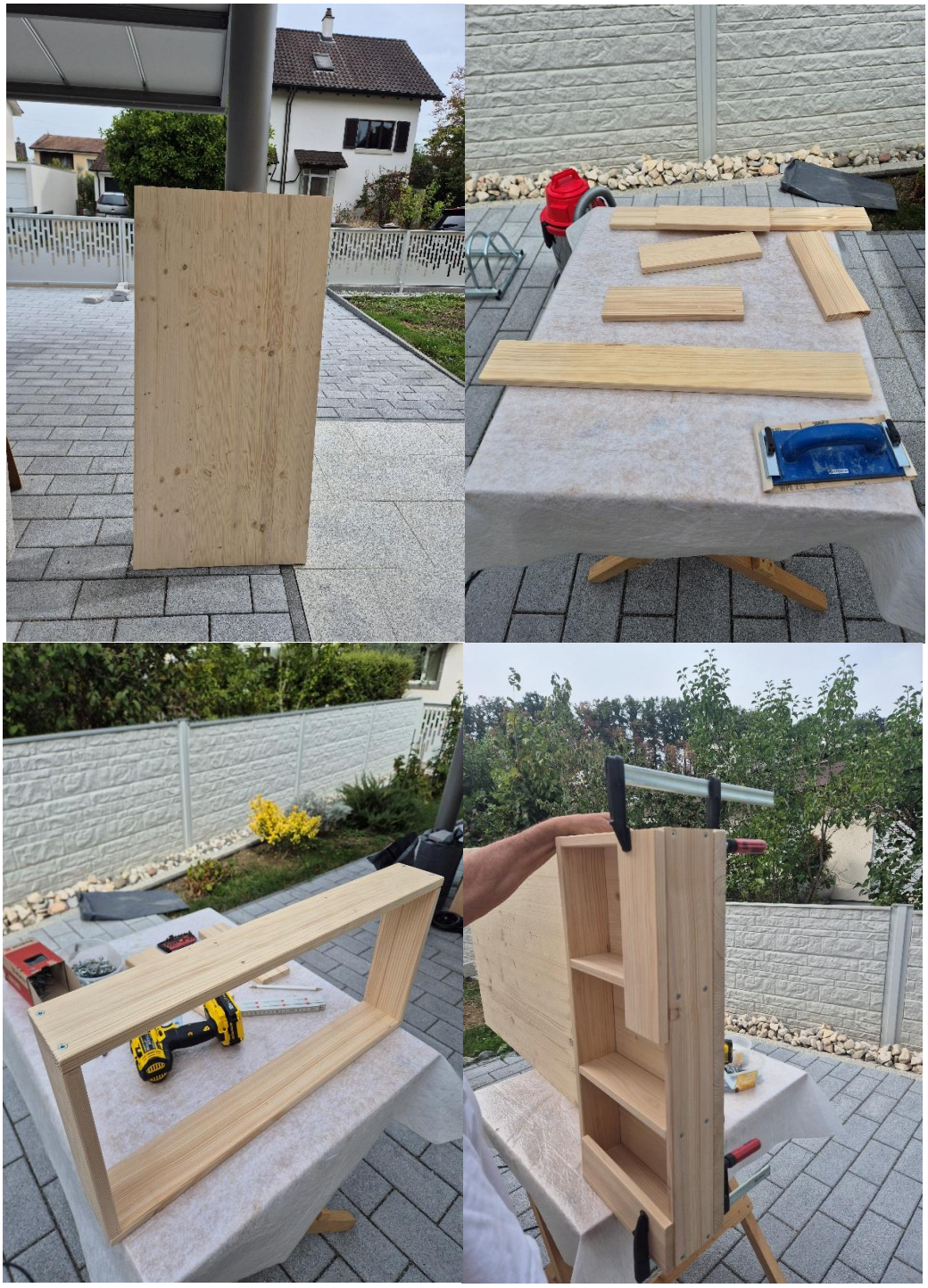


*Abbildung 19: Zuschnitt und Zusammenbau der Holzbauteile*

Nachdem die grösseren Bauteile montiert und die Oberflächen vorbereitet waren, wurde die Wand zweimal gestrichen. Dadurch erhielt der Aufbau eine einheitliche und sauberere Oberfläche.

Für die Aufstellung der Wand wurden seitlich stabile Holzfüsse angebracht. Diese wurden zugeschnitten und geschliffen, bevor sie mit der Grundplatte verbunden wurden. Sie ermöglichen das selbstständige Aufstellen der Demowand.



*Abbildung 20: Oberflächenbearbeitung und Vorbereitung der Standfüsse*



*Abbildung 21: Montage der Standfüsse*

Im Aufbau zeigte sich, dass für verschiedene Komponenten zusätzliche Verstärkungen notwendig waren. Deshalb wurden weitere Holzstücke, Montageplatten und Metallwinkel eingesetzt, damit auch schwerere Bauteile sicher befestigt werden konnten und die Konstruktion ausreichend stabil blieb. Diese Anpassungen waren zu Beginn nicht vollständig absehbar und führten während der Montage zu mehreren zusätzlichen Materialbeschaffungen.



*Abbildung 22: Zusätzliche Verstärkungen und Befestigungsteile*

Nachdem die Vorderseite weitgehend festgelegt war, wurde die Anordnung der Rückseite geplant. Dazu wurden die vorgesehenen Positionen der Kabelkanäle und DIN-Schienen zunächst mit Klebeband auf der Rückwand markiert. Die Anordnung konnte dadurch vor der endgültigen Montage nochmals kontrolliert und angepasst werden.



*Abbildung 23: Vorderseite während der Montage*

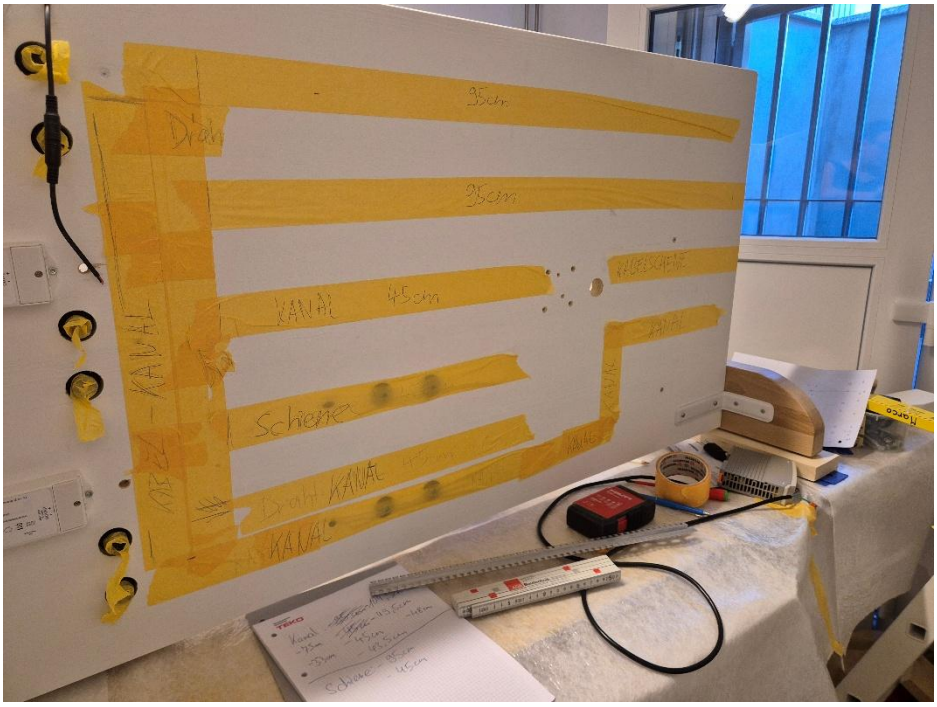



*Abbildung 24: Planung der Kanäle und DIN-Schienen mit Klebeband*

Erst nachdem eine zweckmässige Aufteilung gefunden war, wurden die Kabelkanäle und DIN-Schienen fest montiert. Dabei musste gleichzeitig berücksichtigt werden, welche Schrauben und Befestigungsbolzen von der Vorderseite durch die Grundplatte geführt wurden. Wo möglich, wurden vorhandene Befestigungspunkte auch für weitere Bauteile genutzt.



*Abbildung 25: Montage der Kabelkanäle und DIN-Schienen*

## 3.2 Elektrischer Aufbau und Spannungsversorgung

Parallel zum mechanischen Aufbau wurde mit der Erstellung des Elektroschemas begonnen. Obwohl dieses zu Beginn der Verdrahtung noch nicht vollständig abgeschlossen war, lagen die relevanten Datenblätter und Anschlussinformationen der eingesetzten Komponenten bereits vor. Dadurch konnten die Anschlüsse und die benötigten Versorgungsspannungen frühzeitig festgelegt werden.

Die 230-V-Einspeisung wurde auf drei FI/LS aufgeteilt. Eine Sicherung versorgt die Steckdose der Demowand, eine weitere das 24-VDC-Netzteil und die dritte die übrigen 230-VAC-Verbraucher.

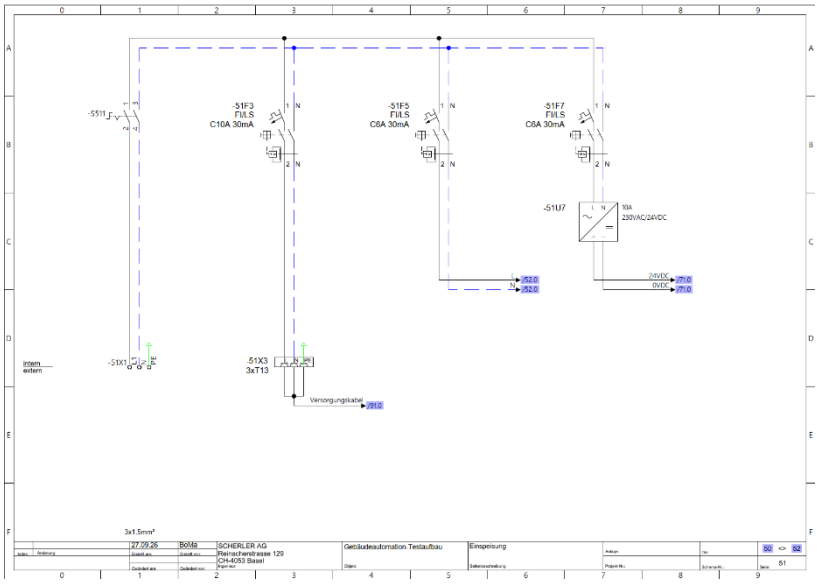



*Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Elektroschema: Einspeisung*

Die Reihenklemmen wurden entsprechend den Funktionsbereichen und den späteren Schemablättern gegliedert. Dadurch konnten die Anschlüsse übersichtlich aufgebaut und bei der weiteren Verdrahtung einfacher mit dem Elektroschema verglichen werden.



*Abbildung 27: Beginn der Verdrahtungsarbeiten*

Bei der Leitungsführung wurde darauf geachtet, Kabel und interne Verdrahtungsdrähte soweit möglich getrennt zu führen. Zunächst wurde die interne Verdrahtung zwischen den Komponenten und Klemmen erstellt. Anschliessend wurden die Feldkabel eingezogen und an den vorgesehenen Klemmen beziehungsweise Geräten angeschlossen.

Vor dem erstmaligen Einschalten wurde die Verdrahtung mit einem Multimeter kontrolliert. Dabei wurden unter anderem Durchgangsprüfungen durchgeführt und überprüft, ob unbeabsichtigte Verbindungen oder Kurzschlüsse vorhanden waren. Bei diesen Kontrollen konnten keine Verdrahtungsfehler festgestellt werden.

Bei den ersten Funktionstests der Pumpen zeigte sich, dass eine Versorgung mit 12 V DC für den kleinen Demonstrationsaufbau vorteilhaft sein könnte, um die Förderwirkung gegenüber 24 V DC zu verringern. Deshalb wurde zusätzlich eine 12-V-DC-Versorgung vorgesehen.

Die Pumpen werden nicht direkt über die Digitalausgänge der SPS versorgt. Die entsprechenden Ausgänge der KL2809 schalten stattdessen jeweils ein Relais, über dessen Kontakt die Versorgung der Pumpe geführt wird. Dadurch wird der Laststrom der Pumpen nicht direkt über die Beckhoff-Ausgangsklemme geführt und Steuer- und Lastkreis bleiben voneinander getrennt.



*Abbildung 28: Verdrahtung der Reihenklemmen*

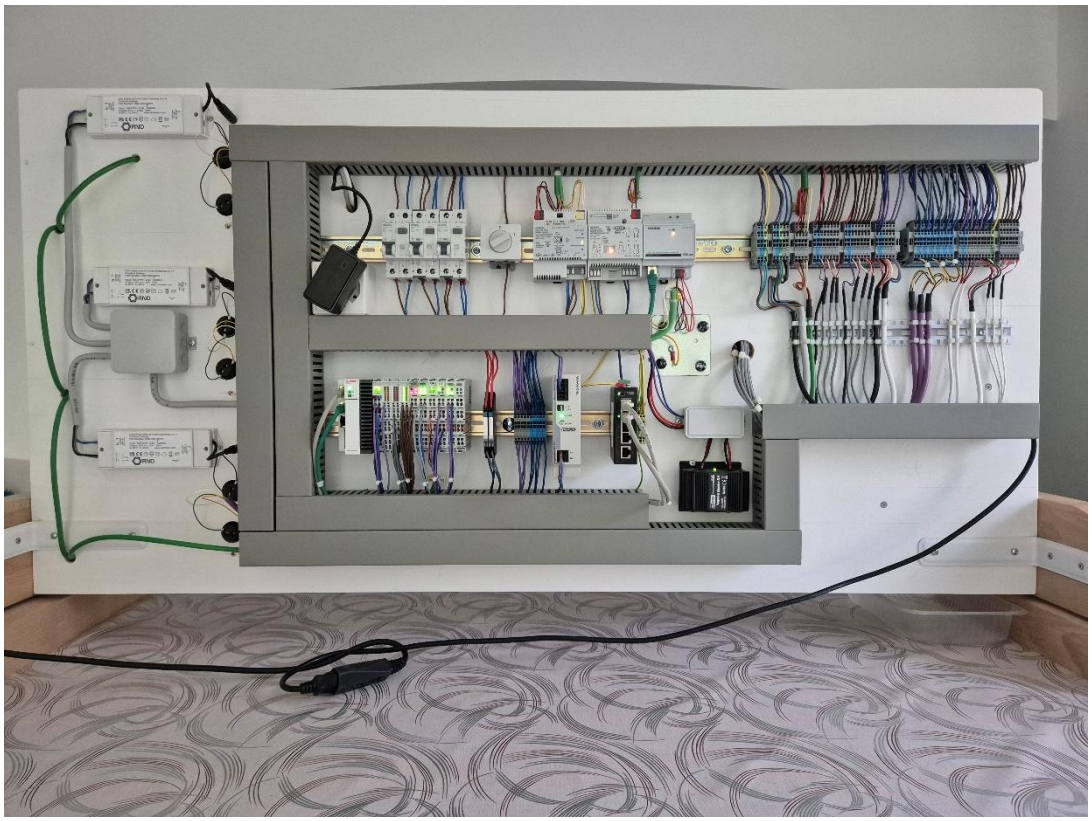


*Abbildung 29: Rückseite nach der Verdrahtung*

## 3.3 SPS und I/O

Die Inbetriebnahme der Beckhoff-Steuerung erfolgte schrittweise. Da verschiedene Komponenten und K-Bus-Klemmen erst im Verlauf der Diplomarbeit verfügbar waren, wurden die meisten neu eingetroffenen Geräte möglichst früh getestet; die Pumpen wurden erst später geprüft. Dadurch sollten Defekte nicht erst am Ende erkannt werden. Dieser zusätzliche Prüfaufwand beanspruchte mehr Zeit als ursprünglich eingeplant.

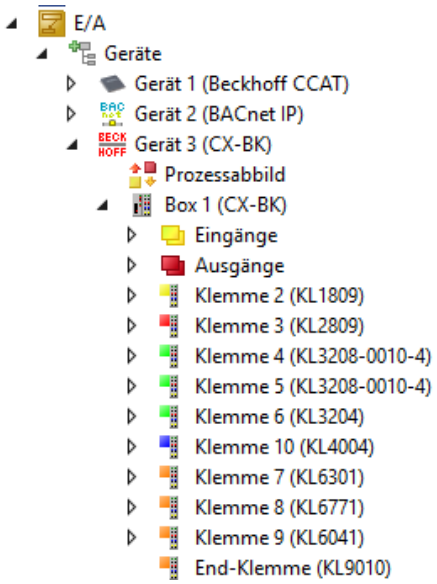



*Abbildung 30: Eingelesene K-Bus-Struktur in TwinCAT 3*

Die CX8191 wurde erstmals in Betrieb genommen, als das übergeordnete Touchpanel getestet werden sollte. Dabei zeigte sich, dass für die Kommunikation zusätzliche Einstellungen auf der CX8191 notwendig waren. Vor der vollständigen Bestückung wurden zunächst die bereits vorhandenen K-Bus-Klemmen in TwinCAT 3 eingelesen und auf ihre Funktion geprüft.

Weitere Klemmen wurden im Verlauf des Projekts ergänzt und ebenfalls eingelesen. Einzelne Ein- und Ausgänge wurden zusätzlich mit dem Multimeter kontrolliert. Nachdem die benötigten Klemmen vollständig vorhanden waren, konnten die angeschlossenen Sensoren und Aktoren schrittweise geprüft werden.

## 3.4 Raumautomation und Beleuchtung

Die drei Demonstrationsräume wurden nach einem einheitlichen Grundprinzip aufgebaut. Bereits bei der mechanischen Planung wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Komponenten übersichtlich angeordnet und ihre Funktionen auf der Vorderseite gut erkennbar sind.



*Abbildung 31: Anordnung der drei Demonstrationsräume*

Die KNX-Taster wurden bündig in die Vorderwand der jeweiligen Räume eingebaut. Dadurch sollte der Aufbau möglichst ähnlich zu einer realen Rauminstallation wirken. Die roten und blauen LED-Anzeigen für den Heiz- beziehungsweise Kühlbetrieb wurden zwischen den Rohranschlüssen der jeweiligen Räume angeordnet. Dadurch befinden sich die Anzeigen direkt im Bereich der zugehörigen Raumfunktion und sind auch aus grösserer Entfernung gut erkennbar.

Die Beleuchtung wurde von Beginn an als Bestandteil der drei Räume vorgesehen. Pro Raum befindet sich ein LED-Streifen im oberen Bereich. Damit das Licht nicht direkt in die Augen des Betrachters abstrahlt, wurde vor den LED-Streifen zusätzlich eine einfache Blende angebracht. Dadurch wird der Raum ausgeleuchtet, während die eigentliche Lichtquelle weniger direkt sichtbar ist.

Die LED-Streifen werden über DALI-Treiber angesteuert. Diese befinden sich auf der Rückseite der Demowand. Für die Leitungsführung wurde jeweils eine Durchführung vorgesehen, sodass die Anschlussleitung des LED-Streifens möglichst direkt auf die Rückseite zum zugehörigen DALI-Treiber geführt werden kann. Dadurch konnten lange sichtbare Leitungswege auf der Vorderseite vermieden werden.




*Abbildung 32: DALI-Betriebsgeräte auf der Rückseite*

Neben den lokalen KNX-Tastern wurde ein KNX-Touchpanel als zusätzliche Bedienebene in die Planung aufgenommen. Es befindet sich auf der Vorderseite im Bereich der Räume und ermöglicht die Bedienung aller drei Räume. Über das Touchpanel können unter anderem die Beleuchtung sowie die jeweiligen Raumbetriebsmodi bedient werden.

Die drei Räume wurden bewusst nach demselben Grundprinzip aufgebaut. Dadurch lassen sich gleiche Funktionen unter unterschiedlichen Bedingungen testen und gleichzeitig verschiedene Kommunikationswege miteinander vergleichen.

## 3.5 Heiz-/Kühlkomponenten

Der hydraulische Teil des Testaufbaus wurde während der Planung deutlich erweitert. Ursprünglich war eine wesentlich einfachere Ausführung vorgesehen. Geplant waren ein Heiz- und ein Kühltank mit jeweils einer Pumpe, einem Stellantrieb und einem Durchflussmelder pro Gruppe. Die Rohrleitung sollte dabei hauptsächlich dazu dienen, eine sichtbare Wasserzirkulation darzustellen. Die Stellantriebe wären zunächst lediglich als ansteuerbare Feldgeräte neben der Verrohrung montiert worden. Zusätzliche Raumstellantriebe, eine erweiterte Verrohrung mit Fussbodenheizverteiler sowie weitere Kommunikationssysteme waren im Pflichtenheft zunächst als Darf-Ziele vorgesehen. In der praktischen Umsetzung zeigte sich jedoch, dass einige dieser Erweiterungen bereits während des mechanischen Aufbaus berücksichtigt werden mussten. Ein späterer Umbau hätte zusätzliche Bohrungen und sichtbare Änderungen an der fertiggestellten Wand beziehungsweise an den Tanks verursacht. Deshalb wurden mehrere dieser Erweiterungen bereits frühzeitig in die Planung aufgenommen.

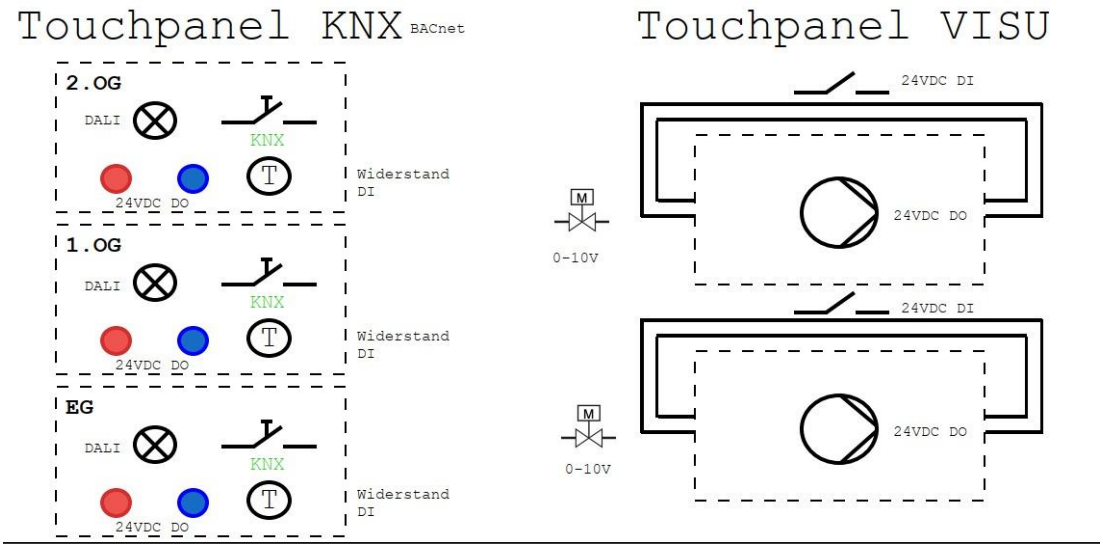



*Abbildung 33: Früher Entwurf des Aufbaus*

**Erweiterung der Verrohrung**

Für die Verbindung der Raumstellantriebe mit dem hydraulischen Aufbau wurde nach einer geeigneten Lösung gesucht. Daraus entstand die Idee, einen Fussbodenheizverteiler einzusetzen. Dieser ermöglichte es, die drei Raumkreise übersichtlich an eine gemeinsame Verteilung anzuschliessen und die Stellantriebe direkt auf dem Verteiler zu montieren.

Ein zusätzlicher Vorteil des eingesetzten Verteilers sind die vorhandenen Durchflussanzeigen. Bei vollständig mit Wasser gefüllten transparenten Leitungen ist eine Strömung optisch nur schwer erkennbar. Über die Durchflussanzeigen kann die Zirkulation hingegen deutlich besser beobachtet werden.



*Abbildung 34: Fussbodenheizverteiler*

Der finale hydraulische Aufbau besteht aus einem Heiz- und einem Kühltank, zwei Pumpen, einem Change-Over-Ventil, dem Fussbodenheizverteiler mit drei Stellantrieben sowie einem gemeinsamen Durchflussmelder.

Das Change-Over-Ventil ermöglicht die Umschaltung des gemeinsamen hydraulischen Kreises zwischen Heiz- und Kühlseite. Dadurch können beide Versorgungsrichtungen mit demselben Verteiler dargestellt werden.

**Temperaturerfassung**

In der ursprünglichen Planung waren vor allem die Raumtemperaturfühler vorgesehen. Im Verlauf des Projekts wurde die Temperaturerfassung erweitert, um den hydraulischen Aufbau besser beobachten und für spätere Versuche nutzen zu können.

Zusätzlich zu den drei Raumtemperaturen werden daher Temperaturen am Heiz- und Kühltank sowie in den jeweiligen Vor- und Rückläufen erfasst. Die hydraulischen Temperaturwerte dienen im finalen Demonstrationsbetrieb der Anzeige und Diagnose und werden nicht für eine automatische Regelung verwendet. Die PT1000-Fühler an den Rohrleitungen wurden direkt am Rohr befestigt. Um einen möglichst guten Kontakt zur Rohrleitung zu erreichen, wurden sie mit Kabelbindern fixiert und zusätzlich mit Isolation abgedeckt.

Durch die Erweiterungen entwickelte sich die ursprünglich einfache Heiz- und Kühlgruppe zu einem deutlich umfangreicheren Demonstrationssystem. Dadurch können nicht nur Pumpen und ein einzelner Stellantrieb getestet werden, sondern verschiedene Feldgeräte und Ansteuerungsarten innerhalb eines gemeinsamen hydraulischen Aufbaus.

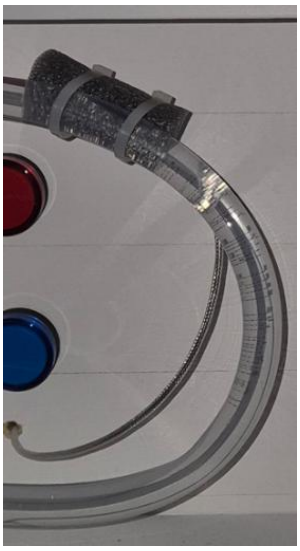


*Abbildung 35: Temperaturfühler mit Isolierung an der Rohrleitung*

Der grössere Funktionsumfang bietet auch nach Abschluss der Diplomarbeit Vorteile. Die Wand kann für weitere Versuche verwendet werden, wobei die Software je nach Testzweck angepasst und vorhandene Kommunikationssysteme für zusätzliche Geräte genutzt werden können.



*Abbildung 36: Vorderseite des aufgebauten Testsystems*

## 3.6 Feldbus- und Netzwerkintegration

Die verschiedenen Kommunikationssysteme wurden nicht gleichzeitig in Betrieb genommen, sondern schrittweise integriert und getestet. Da einige Komponenten erst im Verlauf der Diplomarbeit eintrafen, wurden diese möglichst früh einzeln geprüft. Dadurch konnte jeweils zuerst festgestellt werden, ob das Gerät und die zugehörige Schnittstelle grundsätzlich funktionieren, bevor die Kommunikation in die Gesamtanlage eingebunden wurde.

KNX und DALI bildeten dabei einen der ersten funktionsfähigen Bereiche. Die KNX-Geräte wurden über ETS 6 projektiert und die DALI-Betriebsgeräte über das KNX/DALI-Gateway eingelesen und den entsprechenden Räumen zugeordnet. Anschliessend konnten die drei Beleuchtungen geschaltet und gedimmt werden.

Für die Kommunikation zwischen dem KNX-Touchpanel und der Beckhoff-Steuerung wurde zusätzlich das KNX/BACnet-Gateway integriert. Die benötigten KNX-Datenpunkte wurden dabei auf BACnet-Objekte umgesetzt und über das Ethernet-Netzwerk mit der CX8191 ausgetauscht. Im Verlauf des Projekts wurde die BACnet-Konfiguration auf insgesamt 41 Objekte erweitert, damit die benötigten Befehle und Rückmeldungen der drei Räume übertragen werden konnten.

| Name | Object Function | Linked with | Group Addresses | Length |
|---|---|---|---|---|
| Object No.1, R1 Licht Schalten Befehl | boolean | R1 Licht Schalten Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Schaltbefehl fuer Raum 1 Licht.) | 3/1/1 | 1 bit |
| Object No.2, R1 Licht Dimmwert Befehl | 0...100 % | R1 Licht Dimmwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; absoluter Dimmwert fuer Raum 1 Licht, 0..100 %.) | 3/1/2 | 1 byte |
| Object No.3, R1 Heizsollwert Befehl | Float value | R1 Heizsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Heizsollwert Raum 1 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/1/3 | 2 bytes |
| Object No.4, R1 Kühlsollwert Befehl | Float value | R1 Kuehlsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Kuehlsollwert Raum 1 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/1/4 | 2 bytes |
| Object No.5, R2 Licht Schalten Befehl | boolean | R2 Licht Schalten Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Schaltbefehl fuer Raum 2 Licht.) | 3/2/1 | 1 bit |
| Object No.6, R2 Licht Dimmwert Befehl | 0...100 % | R2 Licht Dimmwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; absoluter Dimmwert fuer Raum 2 Licht, 0..100 %.) | 3/2/2 | 1 byte |
| Object No.7, R2 Heizsollwert Befehl | Float value | R2 Heizsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Heizsollwert Raum 2 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/2/3 | 2 bytes |
| Object No.8, R2 Kühlsollwert Befehl | Float value | R2 Kuehlsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Kuehlsollwert Raum 2 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/2/4 | 2 bytes |
| Object No.9, R3 Licht Schalten Befehl | boolean | R3 Licht Schalten Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Schaltbefehl fuer Raum 3 Licht.) | 3/3/1 | 1 bit |
| Object No.10, R3 Licht Dimmwert Befehl | 0...100 % | R3 Licht Dimmwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; absoluter Dimmwert fuer Raum 3 Licht, 0..100 %.) | 3/3/2 | 1 byte |
| Object No.11, R3 Heizsollwert Befehl | Float value | R3 Heizsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Heizsollwert Raum 3 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/3/3 | 2 bytes |
| Object No.12, R3 Kühlsollwert Befehl | Float value | R3 Kuehlsollwert Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; Kuehlsollwert Raum 3 in Grad C, DPT 9.001.) | 3/3/4 | 2 bytes |
| Object No.13, Global HK Anlage in Betrieb | boolean | HK Anlage in Betrieb (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=Heiz-/Kuehlanlage aktiv, 0=keine aktive Heiz- oder Kuehlanforderung.) | 4/0/1 | 1 bit |
| Object No.14, HK Betriebsart Heizen aktiv | boolean | HK Betriebsart Heizen aktiv (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=tatsaechliche aktive Betriebsart Heizen.) | 4/0/2 | 1 bit |
| Object No.15, Raum 1 Isttemperatur | Float value | R1 Isttemperatur (SPS (Pt1000) -> BACnet/KNX -> MDT; Raum-Isttemperatur Raum 1 in Grad C.) | 4/1/1 | 2 bytes |
| Object No.16, Raum 2 Isttemperatur | Float value | R2 Isttemperatur (SPS (Pt1000) -> BACnet/KNX -> MDT; Raum-Isttemperatur Raum 2 in Grad C.) | 4/2/1 | 2 bytes |
| Object No.17, Raum 3 Isttemperatur | Float value | R3 Isttemperatur (SPS (Pt1000) -> BACnet/KNX -> MDT; Raum-Isttemperatur Raum 3 in Grad C.) | 4/3/1 | 2 bytes |
| Object No.18, Raum 1 Heizsollwert Status | Float value | R1 Heizsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Heizsollwert Raum 1 in Grad C.) | 4/1/2 | 2 bytes |
| Object No.19, Raum 2 Heizsollwert Status | Float value | R2 Heizsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Heizsollwert Raum 2 in Grad C.) | 4/2/2 | 2 bytes |
| Object No.20, Raum 3 Heizsollwert Status | Float value | R3 Heizsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Heizsollwert Raum 3 in Grad C.) | 4/3/2 | 2 bytes |
| Object No.21, Raum 1 Licht Status | boolean | R1 Licht Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Lichtzustand Raum 1.) | 4/1/3 | 1 bit |
| Object No.22, Raum 2 Licht Status | boolean | R2 Licht Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Lichtzustand Raum 2.) | 4/2/3 | 1 bit |
| Object No.23, Raum 3 Licht Status | boolean | R3 Licht Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Lichtzustand Raum 3.) | 4/3/3 | 1 bit |
| Object No.24, Raum 1 Licht Dimmwert Status | 0...100 % | R1 Licht Dimmwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Dimmwert Raum 1 Licht, 0..100 %.) | 4/1/4 | 1 byte |
| Object No.25, Raum 2 Licht Dimmwert Status | 0...100 % | R2 Licht Dimmwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Dimmwert Raum 2 Licht, 0..100 %.) | 4/2/4 | 1 byte |
| Object No.26, Raum 3 Licht Dimmwert Status | 0...100 % | R3 Licht Dimmwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter Dimmwert Raum 3 Licht, 0..100 %.) | 4/3/4 | 1 byte |
| Object No.27, Raum 1 Kühlsollwert Status | Float value | R1 Kuehlsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Kuehlsollwert Raum 1 in Grad C.) | 4/1/5 | 2 bytes |
| Object No.28, Raum 2 Kühlsollwert Status | Float value | R2 Kuehlsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Kuehlsollwert Raum 2 in Grad C.) | 4/2/5 | 2 bytes |
| Object No.29, Raum 3 Kühlsollwert Status | Float value | R3 Kuehlsollwert Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter aktiver Kuehlsollwert Raum 3 in Grad C.) | 4/3/5 | 2 bytes |
| Object No.30, Raum 1 Bedienung gesperrt | boolean | R1 Bedienung gesperrt (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=MDT-Bedienung Raum 1 durch uebergeordnetes Touchpanel gesperrt.) | 4/1/6 | 1 bit |
| Object No.31, Raum 2 Bedienung gesperrt | boolean | R2 Bedienung gesperrt (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=MDT-Bedienung Raum 2 durch uebergeordnetes Touchpanel gesperrt.) | 4/2/6 | 1 bit |
| Object No.32, Raum 3 Bedienung gesperrt | boolean | R3 Bedienung gesperrt (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=MDT-Bedienung Raum 3 durch uebergeordnetes Touchpanel gesperrt.) | 4/3/6 | 1 bit |
| Object No.33, R1 Betriebsmodus Befehl | unsigned | R1 Betriebsmodus Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; globaler Betriebsmodus der Heiz-/Kuehlanlage, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, ...) | 3/0/1 | 1 byte |
| Object No.34, HK Betriebsart Kuehlen aktiv | boolean | HK Betriebsart Kuehlen aktiv (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=tatsaechliche aktive Betriebsart Kuehlen.) | 4/0/3 | 1 bit |
| Object No.35, HK Betriebsart Neutral aktiv | boolean | HK Betriebsart Neutral aktiv (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=keine aktive Heiz- oder Kuehlanforderung, Betriebsart Neutral.) | 4/0/4 | 1 bit |
| Object No.36, R1 Betriebsmodus Status | unsigned | R1 Betriebsmodus Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter globaler Betriebsmodus, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, 3=Kuehlen, 6=Aus.) | 4/0/5 | 1 byte |
| Object No.37, HK Betriebsmodus gesperrt | boolean | HK Betriebsmodus gesperrt (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; 1=Betriebsmodus-Bedienung am MDT durch uebergeordnete Bedienung gesperrt.) | 4/0/6 | 1 bit |
| Object No.38, R2 Betriebsmodus Befehl | unsigned | R2 Betriebsmodus Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; globaler Betriebsmodus der Heiz-/Kuehlanlage, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, ...) | 3/0/2 | 1 byte |
| Object No.39, R2 Betriebsmodus Status | unsigned | R2 Betriebsmodus Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter globaler Betriebsmodus, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, 3=Kuehlen, 6=Aus) | 4/0/7 | 1 byte |
| Object No.40, R3 Betriebsmodus Befehl | unsigned | R3 Betriebsmodus Befehl (MDT -> KNX/BACnet-Gateway -> SPS; globaler Betriebsmodus der Heiz-/Kuehlanlage, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, ...) | 3/0/3 | 1 byte |
| Object No.41, R3 Betriebsmodus Status | unsigned | R3 Betriebsmodus Status (SPS -> BACnet/KNX -> MDT; bestaetigter globaler Betriebsmodus, DPT 20.105 HVAC Control Mode: 0=Auto, 1=Heizen, 3=Kuehlen, 6=Aus) | 4/0/8 | 1 byte |

*Abbildung 37: BACnet Objekte im ETS 6*

Der Change-Over-Antrieb wurde über MP-Bus an die Beckhoff-Klemme KL6771 angebunden. Bei den ersten Versuchen konnte der Antrieb zunächst nicht erreicht werden. Die Ursache lag in der fehlenden Feldversorgung der Klemme. Nachdem diese ergänzt worden war, konnte der Belimo-Antrieb auf MP-Adresse 1 erkannt, adressiert und anschliessend angesteuert werden. Zusätzlich konnte die aktuelle Stellung zurückgelesen werden.

Für Modbus RTU wurde der Modbus-Stellantrieb über die KL6041 angebunden. Die Kommunikation erfolgte mit der Geräteadresse 1 und den eingestellten seriellen Kommunikationsparametern. Die Inbetriebnahme dieses Systems nahm viel Zeit in Anspruch, da während des Projekts auch defekte TA-Slider vorhanden waren und dadurch zuerst zwischen Gerätefehler, Parametrierung und Kommunikationsproblem unterschieden werden musste.

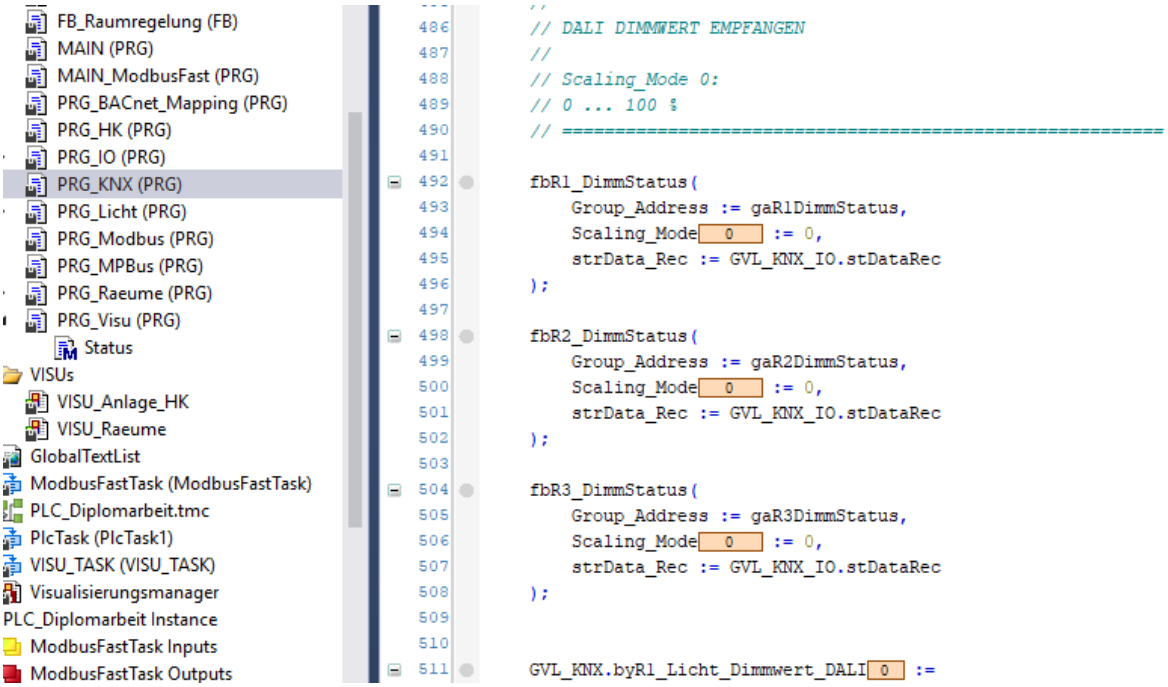
Neben den Bussystemen bildet das Ethernet-Netzwerk die Verbindung zwischen der CX8191, dem KNX/BACnet-Gateway und dem übergeordneten Touchpanel. Über dieses Netzwerk wird auch die TwinCAT-WebVisualisierung aufgerufen.

## 3.7 Bedien- und Visualisierungssysteme

Für die Bedienung des Testaufbaus wurden zwei Touchpanels eingesetzt. Das KNX-Touchpanel war bereits früh für die Bedienung der drei Räume vorgesehen. Es ist direkt in das KNX-System eingebunden und dient vor allem zur Bedienung der Beleuchtung und der Raumbetriebsarten sowie zur Anzeige ausgewählter Statuswerte.

Im Verlauf der Planung wurde zusätzlich ein übergeordnetes Touchpanel ergänzt. Dieses greift über das Ethernet-Netzwerk auf die TwinCAT-WebVisualisierung der CX8191 zu. Dadurch können nicht nur die Raumfunktionen, sondern auch die Komponenten der Heiz-/Kühlgruppe zentral angezeigt und bedient werden.

Das übergeordnete Touchpanel wurde bewusst als zusätzliche Bedienebene ausgeführt. Dadurch kann der Testaufbau sowohl aus Sicht einer lokalen Raumautomation über KNX als auch aus Sicht einer übergeordneten Anlagenbedienung demonstriert werden. Gleichzeitig eignet sich die WebVisualisierung für Inbetriebnahme- und Testzwecke, da mehrere Feldgeräte direkt bedient und deren Rückmeldungen angezeigt werden können.



# 4 Software und Steuerung

## 4.1 Softwarearchitektur TwinCat 3

Die zentrale Software des Testaufbaus wurde in TwinCAT 3.1 Build 4024.75 auf der Beckhoff CX8191 umgesetzt. Das SPS-Programm wurde so aufgebaut, dass Hardwarezugriffe, Kommunikationssysteme und Anlagenfunktionen möglichst voneinander getrennt verarbeitet werden. Dadurch konnten die einzelnen Bereiche während der Inbetriebnahme schrittweise getestet und bei Fehlern gezielter untersucht werden.

Die physikalischen Ein- und Ausgänge werden zunächst über ein I/O-Mapping auf interne Variablen übertragen. Die eigentlichen Anlagenfunktionen greifen anschliessend auf diese Variablen zu und nicht direkt auf die Hardwareadressen. Damit bleibt die Programmlogik übersichtlicher und Änderungen an der Klemmenbelegung können einfacher nachvollzogen werden.

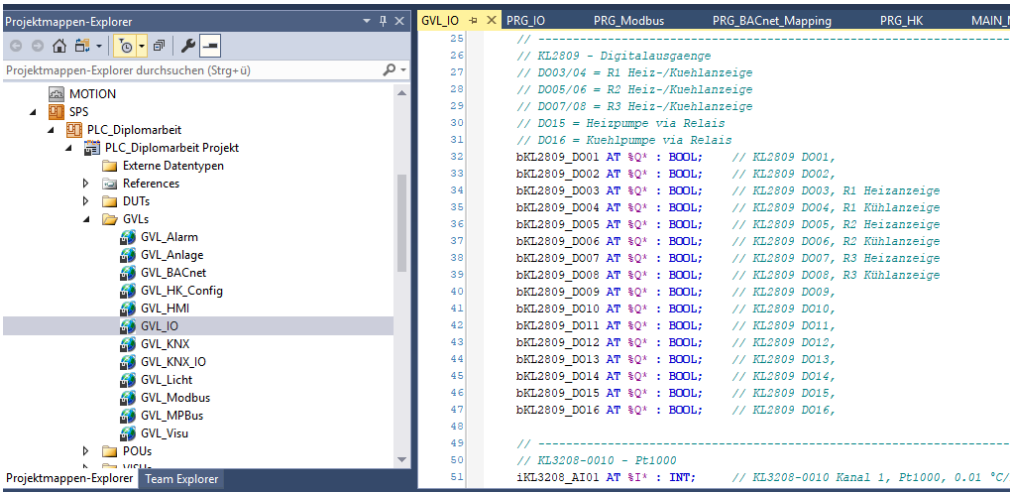



*Abbildung 38: I/Os werden von der Karte gelesen und zur GVL weitergeleitet*

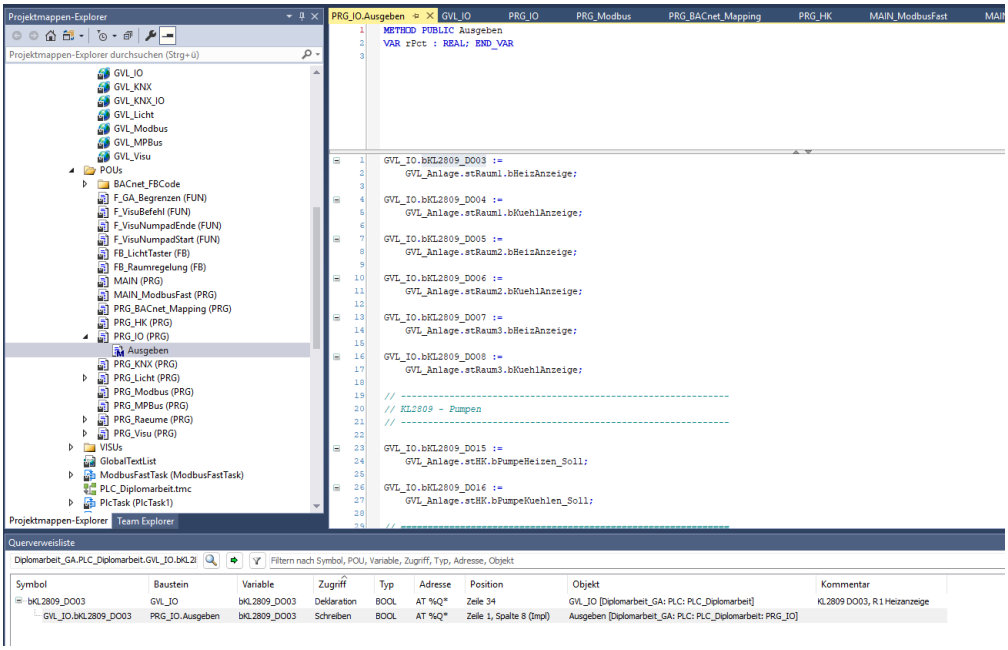



*Abbildung 39: Von der GVL gehts zum PRG wo es weitergeleitet wird*

Für die verschiedenen Kommunikationssysteme wurden separate Programmbereiche verwendet. Dazu gehören unter anderem KNX, BACnet/IP, MP-Bus und Modbus RTU. Die empfangenen Werte werden dort auf die internen Anlagenvariablen umgesetzt beziehungsweise aus diesen wieder an die Feldgeräte übertragen.

Die eigentlichen Funktionen sind anschliessend nach Aufgabenbereichen gegliedert. Die Lichtsteuerung verarbeitet die Befehle der KNX-Bedienung und gibt die entsprechenden Schalt- und Dimmwerte weiter. Die Raumfunktionen verwalten die Betriebsarten der drei Räume und die zugehörigen Stellbefehle. Ein weiterer Programmteil übernimmt die Funktionen der Heiz-/Kühlgruppe mit Pumpen, Change-Over-Antrieb und den zugehörigen Feldgeräten.

Die WebVisualisierung ist ebenfalls an die internen Anlagenvariablen angebunden. Dadurch können Zustände angezeigt und Handbefehle an die Steuerung übergeben werden, ohne dass die Visualisierung direkt auf die physikalischen Ausgänge zugreift.

Für den normalen SPS-Ablauf wird ein zyklischer Task verwendet. Die Modbus-Kommunikation wurde zusätzlich in einem separaten schnelleren Task ausgeführt, damit die Kommunikation mit dem TA-Slider unabhängig von den übrigen Programmteilen verarbeitet werden kann.

Im finalen Demonstrationsbetrieb liegt der Schwerpunkt der Software auf der Ansteuerung, Kommunikation und Rückmeldung der Feldgeräte. Eine vollständige automatische Raumtemperaturregelung ist nicht Bestandteil des finalen Softwarestands.

| **Softwarebereich** | **Aufgabe** |
|---|---|
| I/O Mapping | Zuordnung der Beckhoff Ein- und Ausgänge |
| KNX / DALI | Lichtbefehle und KNX-Kommunikation |
| BACnet/IP | Datenaustausch KNX-Touchpanel und SPS |
| MP-Bus | Ansteuerung und Rückmeldung Change-Over |
| Modbus RTU | Ansteuerung TA-Slider |
| Licht | Schalten und Dimmen der drei Räume |
| Räume | Betriebsarten und Raumstellbefehle |
| Heiz/Kühl | Pumpen, Change-Over und Anlagenfunktionen |
| WebVisu | Anzeige, Handbedienung und Bedienpriorität |

## 4.2 Kommunikationsschnittstellen

Für die Kommunikation mit den verschiedenen Feldgeräten werden in TwinCAT mehrere unterschiedliche Schnittstellen verwendet. Jede Schnittstelle wird in einem eigenen Programmbereich verarbeitet. Dadurch konnten die Bussysteme während der Inbetriebnahme auch unabhängig voneinander getestet werden.

### KNX und DALI

Die KNX-Kommunikation zwischen der Beckhoff-Steuerung und dem KNX-System erfolgt über die Klemme KL6301. Die empfangenen KNX-Werte werden in der SPS auf interne Variablen übertragen und anschliessend von den jeweiligen Funktionen weiterverarbeitet.

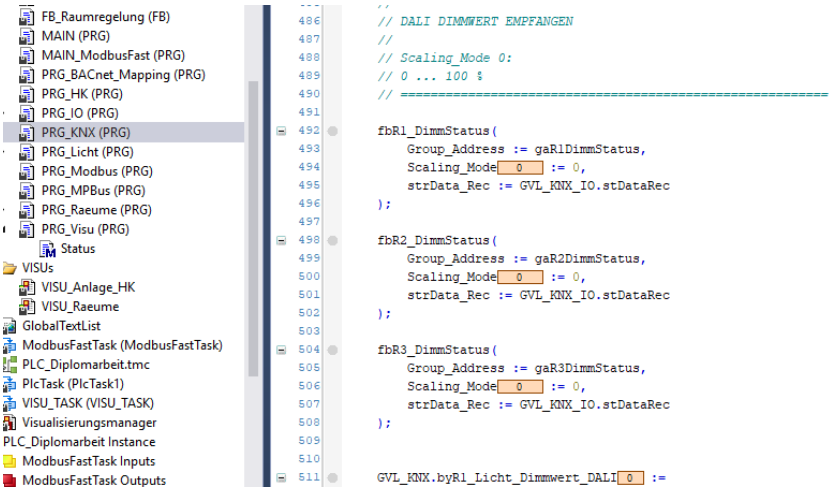



*Abbildung 40: Einlesen der DALI-Dimmrücmeldungen über KNX*

Für die Beleuchtung gibt die SPS die Schalt- und Dimmwerte wieder über KNX aus. Das KNX/DALI-Gateway übernimmt danach die Umsetzung auf DALI und steuert die entsprechenden DALI-Treiber der drei Räume an. Dadurch bleibt die SPS bewusst Bestandteil des Kommunikationswegs und kann die verschiedenen Bedienebenen und Rückmeldungen verarbeiten.

### BACnet/IP

Für den Austausch zwischen dem KNX-Touchpanel und der CX8191 wird zusätzlich BACnet/IP eingesetzt. Das KNX/BACnet-Gateway setzt ausgewählte KNX-Datenpunkte auf BACnet-Objekte um.

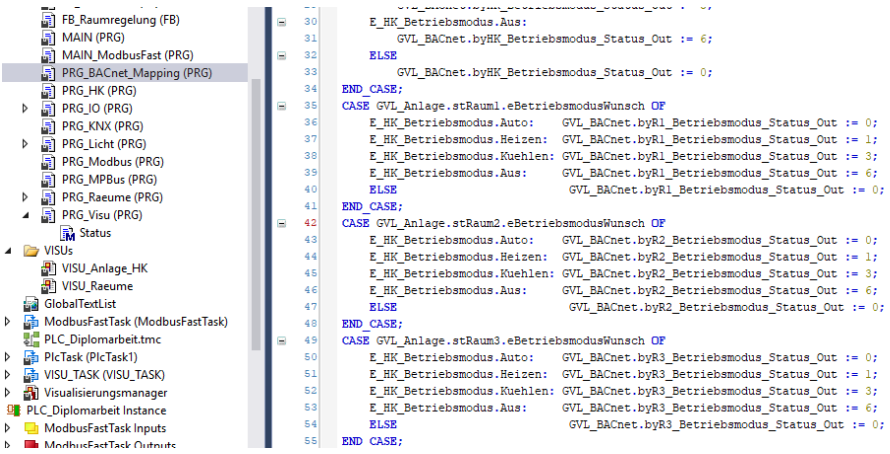



*Abbildung 41: Umsetzung der Raumbetriebsarten auf BACnet Statuswerte*

Im Verlauf des Projekts wurde die BACnet-Konfiguration auf 41 Objekte erweitert. Darüber werden unter anderem die Betriebsarten der drei Räume sowie die benötigten Statuswerte zwischen Touchpanel und SPS übertragen.

Die BACnet-Kommunikation wurde in TwinCAT in einem eigenen Programmbereich verarbeitet. Empfangene Werte werden den internen Raumvariablen zugeordnet, während Statusinformationen der SPS wieder auf die entsprechenden BACnet-Objekte geschrieben werden.

### MP-Bus

Der Belimo LR24A-MP wird über die KL6771 angesprochen. Der Antrieb wurde auf MP-Adresse 1 eingerichtet.

Über die MP-Bus-Kommunikation kann die SPS dem Change-over-Antrieb einen Stellwert vorgeben und gleichzeitig die aktuelle Position zurücklesen. Dadurch kann sowohl die Ansteuerung als auch die Rückmeldung des Feldgeräts über dasselbe Bussystem erfolgen.

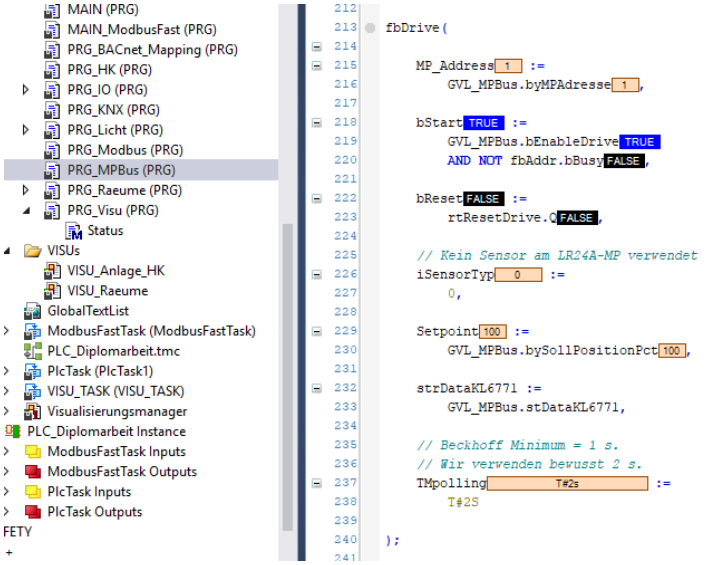



*Abbildung 42: Erfolgreiche MP-Bus-Kommunikation mit dem Belimo-Antrieb*

### Modbus RTU

Der TA-Slider ist über die KL6041 mit der Beckhoff-Steuerung verbunden. Für die Kommunikation wurde das Gerät auf Modbus-Adresse 1 eingerichtet. Verwendet werden 9600 Baud, 8 Datenbits, gerade Parität und 1 Stoppbit (8E1).

Der Stellwert wird von der SPS über Modbus RTU an den Antrieb übertragen. Die Modbus-Kommunikation wurde in einem separaten Task verarbeitet, damit die serielle Kommunikation unabhängig vom übrigen SPS-Programm ausgeführt werden kann.

Im finalen Demonstrationsbetrieb dient diese Schnittstelle vor allem dazu, die Ansteuerung eines seriell angebundenen Feldgeräts praktisch darzustellen.

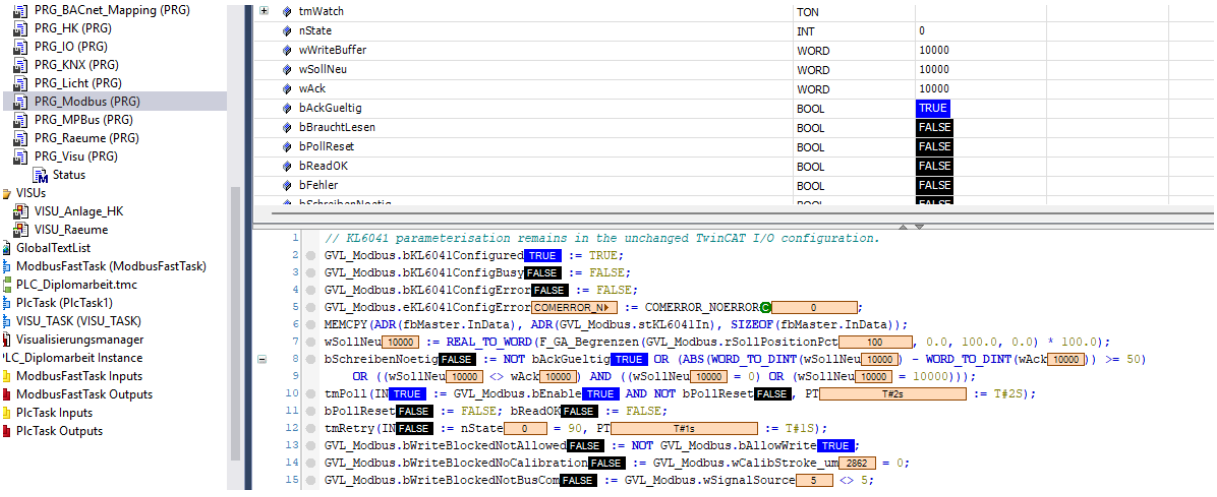



*Abbildung 43: Verarbeitung und Überwachung der Modbus-Kommunikation zum TA-Slider*

## 4.3 Lichtsteuerung

Jeder der drei Demonstrationsräume verfügt über eine separat schalt- und dimmbare DALI-Beleuchtung. Die Bedienung kann über den jeweiligen KNX-Taster, das KNX-Touchpanel oder über das übergeordnete WebVisu-Touchpanel erfolgen. Unabhängig von der verwendeten Bedienebene wird dabei dieselbe Raumbeleuchtung angesteuert.

Die verschiedenen Bedienbefehle werden in der Beckhoff-SPS zusammengeführt. Der gültige Schalt- beziehungsweise Dimmwert wird anschliessend über KNX an das KNX/DALI-Gateway übertragen. Das Gateway setzt den Wert auf DALI um und steuert den entsprechenden LED-Treiber des jeweiligen Raumes an. Die Helligkeit wird innerhalb der SPS als Wert von 0 bis 100 % verarbeitet. Für die Bedienung über die WebVisu werden Werte unter 10 % als ausgeschaltet behandelt. Damit wird verhindert, dass ein sehr kleiner Dimmwert in der Visualisierung noch als eingeschaltete Beleuchtung dargestellt wird. Die jeweils gültige Lichtvorgabe wird zwischen den Bedienebenen synchronisiert, sofern die aktuelle Bedienpriorität dies zulässt.

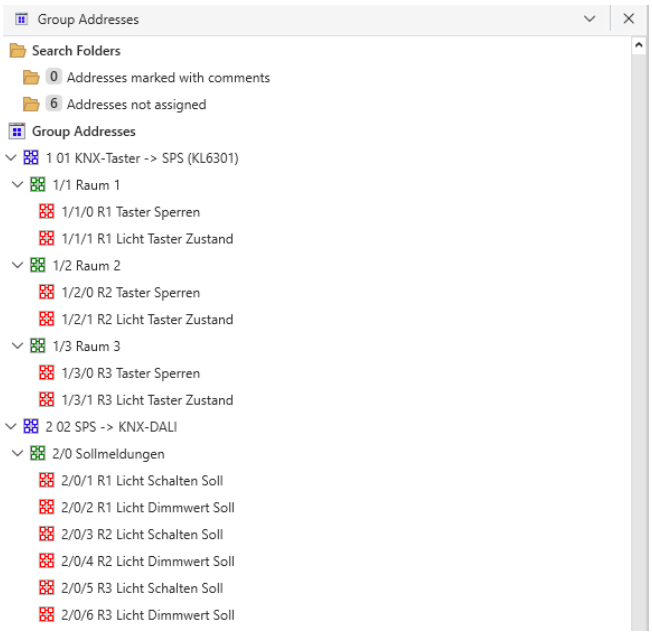



*Abbildung 44: Gruppenadressen für die Lichtsteuerung*

```
fbR1(bTaster := GVL_KNX.bR1_Taster_Zustand,
    bEnable := NOT GVL_Anlage.bWebVisuHandAktiv AND GVL_KNX_IO.bReady,
    bSync := GVL_Anlage.bNormalLichtSync OR GVL_Anlage.bWebVisuHandAktiv,
    bSyncLichtSoll := GVL_Anlage.aNormal[1].bLichtEin,
    bySyncDimmwertSoll := GVL_Anlage.aNormal[1].byDimmPct,
    tLangdruck := GVL_Licht.tLangdruck, tDimmIntervall := GVL_Licht.tDimmIntervall,
    byDimmschritt := GVL_Licht.byDimmschritt, byDimmMin := GVL_Licht.byDimmMin);
GVL_Licht.aTasterNeu[1] := fbR1.bSchaltwertGeaendert OR fbR1.bDimmwertGeaendert;
GVL_Licht.aTasterEin[1] := fbR1.bLichtSoll;
GVL_Licht.aTasterPct[1] := fbR1.byDimmwertSoll;
GVL_Licht.bR1_Langdruck_Aktiv := fbR1.bLangdruckAktiv;
GVL_Licht.bR1_Dimmrichtung_Auf := fbR1.bDimmrichtungAuf;
```

*Abbildung 45: Ausschnitt vom Programm das den Funktionsbaustein FB_Taster aufruft und die Variablen mit den GVL's weitergibt*

## 4.4 Raumfunktionen

Die drei Demonstrationsräume wurden softwareseitig nach demselben Grundprinzip aufgebaut. Jeder Raum verfügt über eine Beleuchtung, eine Raumtemperaturanzeige, eine rote und blaue Betriebsanzeige sowie einen Stellantrieb.

Im finalen Demonstrationsbetrieb wird die Raumtemperatur nicht automatisch geregelt. Stattdessen wird der gewählte Raumbetriebsmodus direkt als Demonstrationsbefehl verwendet. Dadurch kann die vollständige Bedien- und Ansteuerungskette vom Touchpanel beziehungsweise von der SPS bis zum jeweiligen Raumventil und zur Betriebsanzeige geprüft werden.

Für jeden Raum stehen vier Betriebsmodi zur Verfügung:

| Betriebsmodus | Wert | Verhalten |
|---|---|---|
| AUTO | 0 | Neutraler Zustand, da keine automatische Temperaturregelung |
| HEIZEN | 1 | Heizwunsch aktiv, rote Anzeige ein, Ventilsollwert 100 % |
| KÜHLEN | 3 | Kühlwunsch aktiv, blaue Anzeige ein, Ventilsollwert 100 % |
| AUS | 6 | Keine Anforderung, Ventilsollwert 0 %, Anzeigen aus |

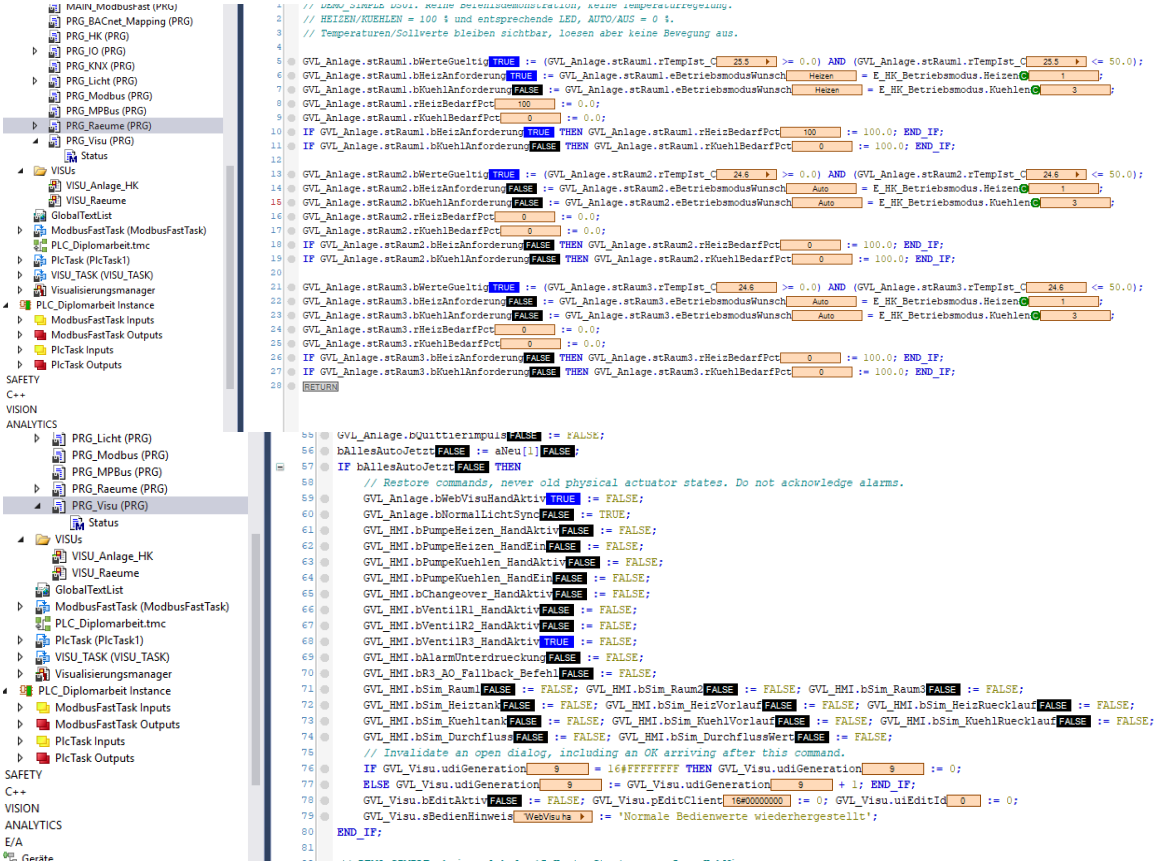


*Abbildung 46: Softwareausschnitt Raumlogik Demonstrationsbetriebs*

Die Betriebsmodi können über das KNX-Touchpanel oder über die WebVisualisierung vorgegeben werden. Die zugehörigen Zustände werden innerhalb der SPS verarbeitet und den jeweiligen Raumfunktionen zugeordnet.

Die Raumventile von Raum 1 und Raum 2 werden über 0–10 V angesteuert. Raum 3 verwendet den über Modbus RTU angebundenen TA-Slider. Im normalen Demonstrationsbetrieb folgt der Ventilstellwert dem gewählten Betriebsmodus. Über die WebVisu können die Ventile zusätzlich direkt im Handbetrieb vorgegeben werden, wodurch die Aktoren unabhängig von den Raumbetriebsarten getestet werden können.

Die drei Raumtemperaturen werden über PT1000-Fühler erfasst und auf der Visualisierung angezeigt. Sie dienen im finalen Softwarestand ausschliesslich der Anzeige und Diagnose und haben keinen automatischen Einfluss auf die Stellung der Raumventile.

## 4.5 Heiz-/Kühlfunktionen

Die gemeinsame Heiz-/Kühlgruppe wird im finalen Demonstrationsbetrieb aus den direkt gewählten Raumbetriebsarten der drei Räume angesteuert. Die SPS wertet dazu aus, wie viele Räume einen Heiz- beziehungsweise Kühlwunsch vorgeben.

Die Richtung mit der grösseren Anzahl an Anforderungen bestimmt die gemeinsame Anlagenrichtung:

- mehr Heizwünsche als Kühlwünsche = Heizbetrieb
- mehr Kühlwünsche als Heizwünsche = Kühlbetrieb
- Gleichstand oder keine Anforderung = neutraler Zustand

Im neutralen Zustand bleiben beide Pumpen ausgeschaltet. Der Change-Over-Antrieb muss dabei nicht in eine definierte Neutralstellung fahren, sondern kann seine zuletzt angefahrene Position beibehalten.

Wird eine Heiz- oder Kühlrichtung gewählt, wird die entsprechende Pumpe angesteuert. Zusätzlich können beide Pumpen über die WebVisualisierung direkt im Handbetrieb bedient werden. Dadurch lässt sich die Funktion der Pumpenansteuerung unabhängig von den Raumwünschen testen.

Das Change-Over-Ventil wird über den MP-Bus-Stellantrieb und den MP-Bus angesteuert. Im normalen Demonstrationsbetrieb folgt seine Sollposition der von der SPS bestimmten Heiz- beziehungsweise Kühlrichtung. Über die WebVisu kann der Antrieb zusätzlich direkt vorgegeben werden, wodurch sich die MP-Bus-Kommunikation und die Stellbewegung auch unabhängig von der übrigen Logik prüfen lassen. Die Temperaturen von Heiztank, Kühltank sowie den jeweiligen Vor- und Rückläufen werden über PT1000-Fühler eingelesen und in der WebVisualisierung dargestellt. Im finalen Demonstrationsbetrieb dienen diese Werte jedoch nur der Anzeige und Diagnose. Sie beeinflussen die Pumpen, das Change-over-Ventil und die Raumventile nicht automatisch.

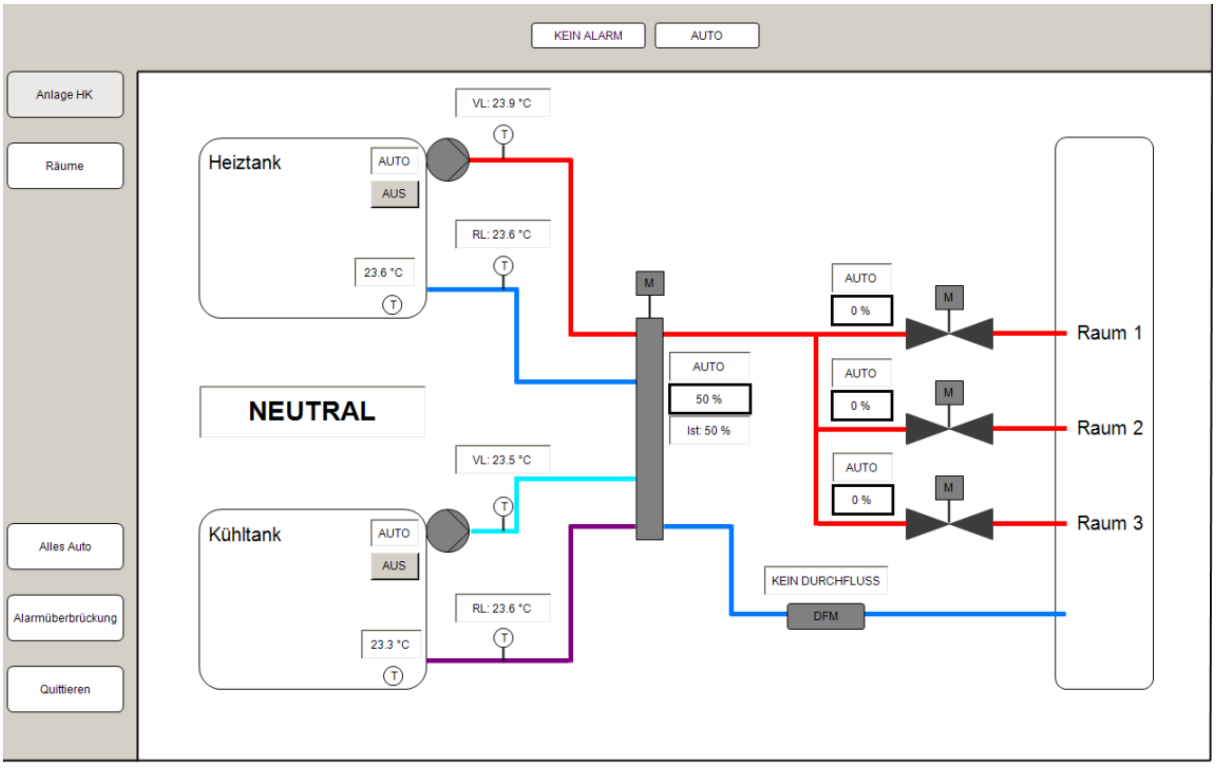



*Abbildung 47: VISU der HK-Anlage*

## 4.6 Bedienpriorität und Handbetrieb

Für den Testaufbau stehen drei Bedienebenen zur Verfügung: die KNX-Taster in den Räumen, das KNX-Touchpanel sowie das übergeordnete WebVisu-Touchpanel. Damit sich unterschiedliche Bedienbefehle nicht gegenseitig beeinflussen, wurde eine klare Prioritätsstruktur umgesetzt.

Die höchste Priorität besitzt das übergeordnete WebVisu-Touchpanel. Sobald über die WebVisu eine Handbedienung ausgeführt wird, wechselt die Anlage in den Zustand HAND. Während dieser Zeit werden Bedienbefehle des KNX-Touchpanels und der KNX-Taster für die betroffenen Funktionen gesperrt beziehungsweise nicht übernommen. Status- und Rückmeldedaten bleiben weiterhin sichtbar.

Über die WebVisu können unter anderem Beleuchtung, Raumbetriebsarten, Pumpen, Change-over-Antrieb und Raumventile direkt bedient werden. Dadurch eignet sich die übergeordnete Bedienebene besonders für Demonstrations- und Inbetriebnahmezwecke.

Zur Rückgabe der Bedienhoheit wurde die Funktion «Alles Auto» umgesetzt. Dabei werden die über die WebVisu gesetzten Handbefehle, Übersteuerungen und die Alarmüberbrückung aufgehoben. Anschliessend werden das KNX-Touchpanel und die KNX-Taster wieder für die normale Bedienung freigegeben. Wichtig ist dabei, dass «Alles Auto» keine festen Standardwerte in die Anlage schreibt. Nach der Rückgabe werden wieder die zuletzt gültigen Werte der normalen KNX-Bedienebene verwendet. Der Begriff AUTO beschreibt somit die Bedienhoheit und nicht eine automatische Raumtemperaturregelung.

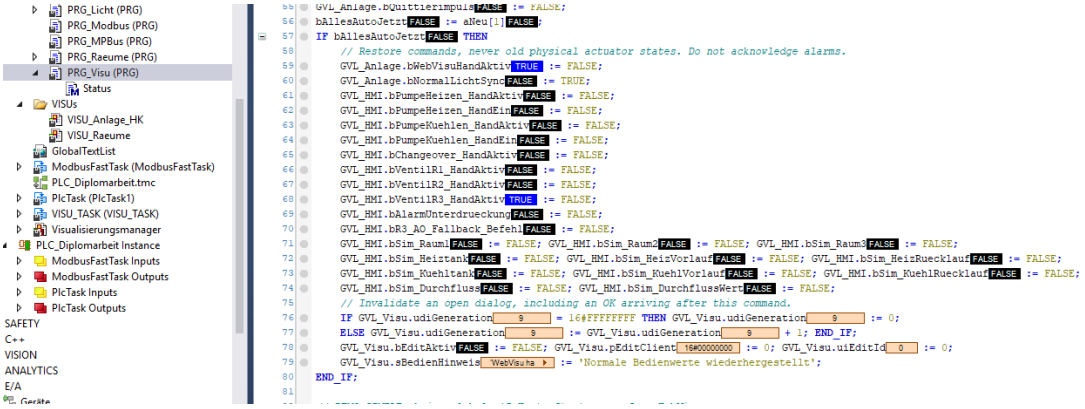



*Abbildung 48: Softwareausschnitt Online: Vor "Alles Auto" drücken*




*Abbildung 49: Softwareausschnitt Online: Nach "Alles Auto" drücken*

## 4.7 Alarm- und Sicherheitsfunktionen

Für die Heiz-/Kühlgruppe wurde eine Durchflussüberwachung umgesetzt. Im gemeinsamen Rücklauf befindet sich ein Durchflussmelder, der der SPS meldet, ob bei laufender Pumpe tatsächlich eine Wasserzirkulation vorhanden ist.

Sobald eine Pumpe eingeschaltet wird, startet in der SPS eine Überwachungszeit von 5 Sekunden. Innerhalb dieser Zeit muss der Durchflussmelder ein entsprechendes Signal liefern. Wird nach Ablauf der Überwachungszeit kein Durchfluss erkannt, wird ein gespeicherter Durchflussalarm ausgelöst und die Pumpenansteuerung abgeschaltet.

Der Alarm wird auf der WebVisualisierung angezeigt und kann dort quittiert werden. Durch die Quittierung wird der gespeicherte Alarm zurückgesetzt und ein neuer Startversuch ermöglicht. Besteht die Pumpenanforderung weiterhin, kann die Pumpe erneut anlaufen und die 5-Sekunden-Überwachung beginnt von vorne. Wird weiterhin kein Durchfluss erkannt, wird der Alarm erneut ausgelöst.

Für Inbetriebnahme- und Demonstrationszwecke ist zusätzlich eine Alarmüberbrückung vorhanden. Bei aktiver Überbrückung wird ein fehlender Durchfluss weiterhin angezeigt, die automatische Abschaltung der Pumpe jedoch unterdrückt. Die Überbrückung gilt als Handeingriff der WebVisu und wird mit der Funktion «Alles Auto» wieder aufgehoben.

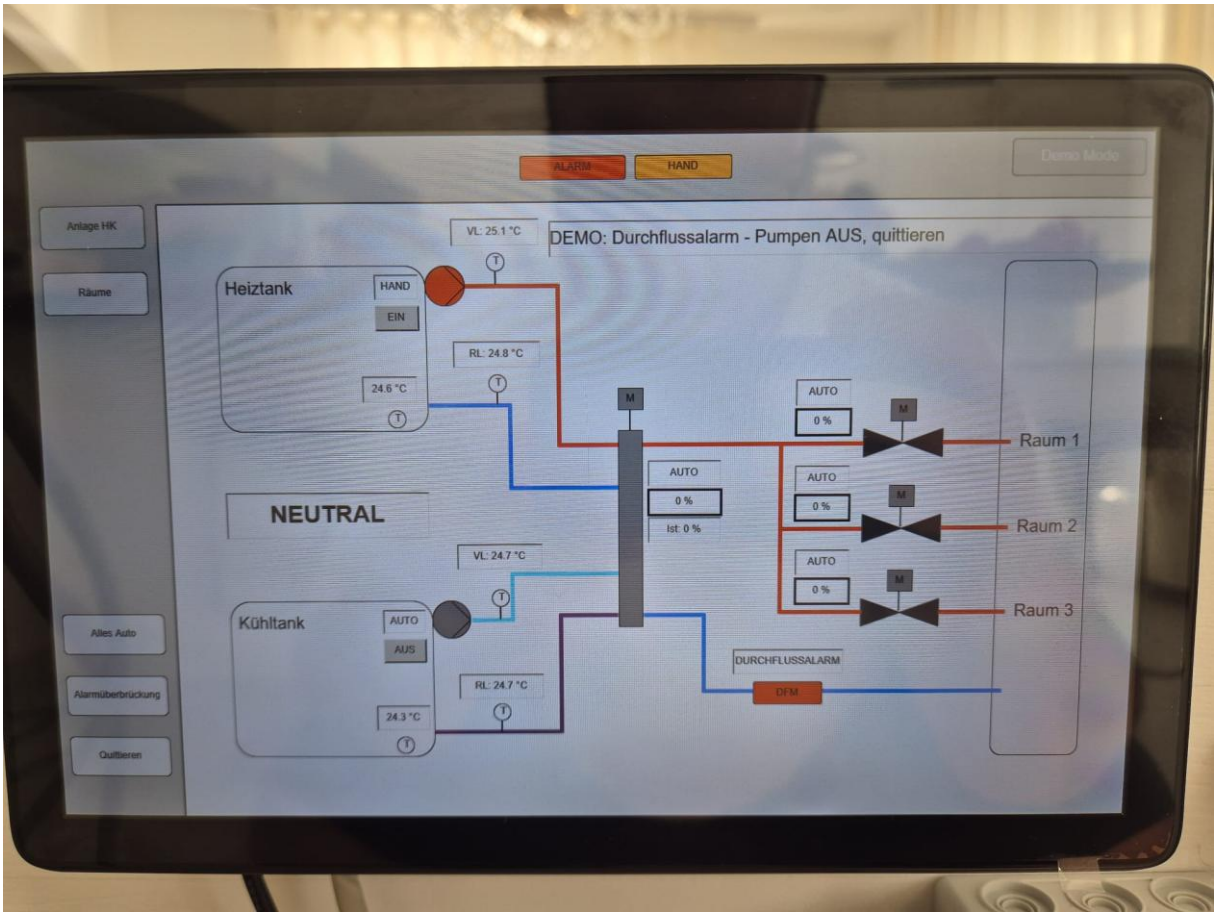



*Abbildung 50:Anzeiege der Störung auf dem Touchpanel*

## 4.8 WebVisualisierung

Für das übergeordnete Touchpanel wurde mit TwinCAT eine WebVisualisierung erstellt. Diese wird direkt von der CX8191 bereitgestellt und über das Ethernet-Netzwerk im Browser des Touchpanels aufgerufen. Die Visualisierung wurde auf eine feste Auflösung von 1280 × 800 Pixel ausgelegt.

Während der Erstellung wurde der Aufbau der Visualisierung mehrfach vereinfacht. Im finalen Stand bestehen zwei Hauptseiten: «Anlage HK» und «Räume». Separate Service- und Alarmseiten wurden nicht weitergeführt. Dadurch bleiben die für den Demonstrationsbetrieb benötigten Informationen auf wenige Bedienseiten beschränkt.

Auf der Seite «Anlage HK» wird der hydraulische Teil des Testaufbaus dargestellt. Dazu gehören die Heiz- und Kühlpumpe, der Change-Over-Antrieb, die drei Raumventile, der Durchflusszustand sowie die Temperaturen von Heiz- und Kühltank und den jeweiligen Vor- und Rückläufen. Pumpen, Change-Over-Antrieb und Raumventile können für Test- und Demonstrationszwecke zusätzlich direkt über die WebVisu bedient werden.

Die Seite «Räume» stellt die drei Demonstrationsräume nebeneinander dar. Pro Raum werden die Beleuchtung, die Raumtemperatur, der gewählte Betriebsmodus und der zugehörige Betriebszustand angezeigt. Die Beleuchtung und die Betriebsmodi AUTO, HEIZEN, KÜHLEN und AUS können ebenfalls über diese Bedienebene vorgegeben werden.

In der Kopfzeile wird zusätzlich dargestellt, ob sich die Anlage im Zustand AUTO oder HAND befindet und ob ein Alarm vorhanden ist. Die Anzeige AUTO/HAND bezieht sich dabei auf die aktuelle Bedienpriorität. Eine Bedienung über die WebVisu führt zum Handbetrieb der übergeordneten Bedienebene. Mit «Alles Auto» werden diese Eingriffe wieder aufgehoben und die Bedienung über KNX freigegeben.

Die WebVisualisierung dient damit nicht nur als Bedienoberfläche, sondern auch als Hilfsmittel bei der Inbetriebnahme. Feldgeräte können direkt angesteuert und gleichzeitig deren Rückmeldungen beziehungsweise Messwerte beobachtet werden.

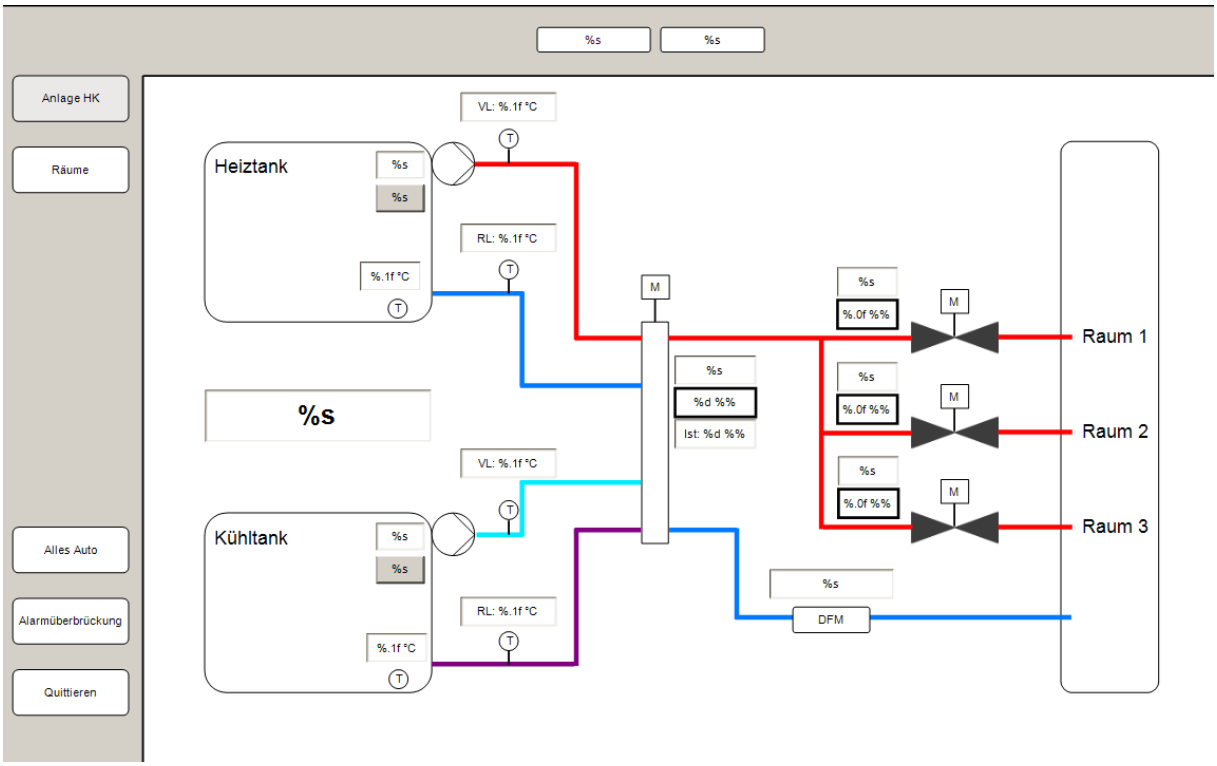



*Abbildung 51:Anlage HK VISU*

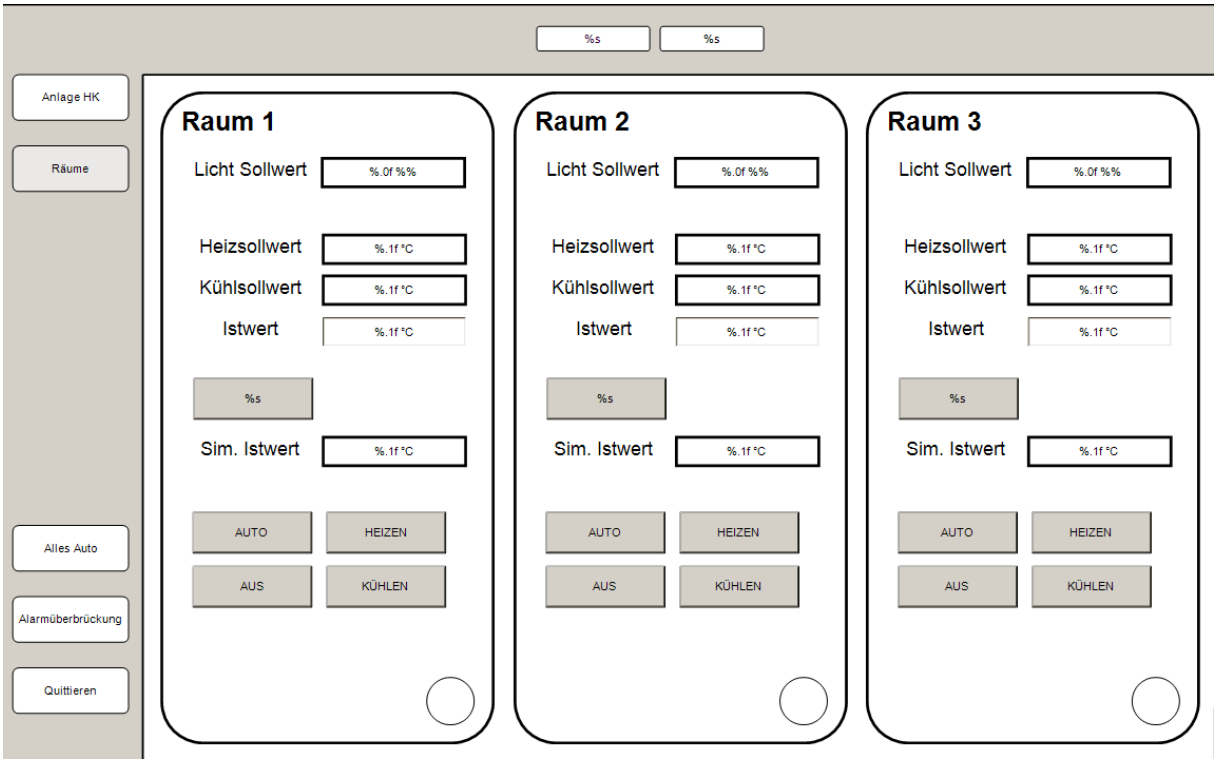



*Abbildung 52:Räume VISU*

# 5 Inbetriebnahme und Funktionskontrolle

## 5.1 Vorgehen bei der Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme erfolgte teilweise bereits während des Aufbaus. Viele Geräte wurden nach Erhalt möglichst früh einzeln auf ihre Funktion geprüft, bevor sie endgültig in die Demowand integriert wurden. Dadurch konnte verhindert werden, dass ein defektes Gerät erst bei der abschliessenden Inbetriebnahme erkannt wird. Die Pumpen bildeten dabei eine Ausnahme und wurden erst im aufgebauten hydraulischen System getestet.

Für die abschliessende Kontrolle wurde hauptsächlich das Elektroschema als Prüfgrundlage verwendet. Die einzelnen Datenpunkte und SPS-Karten wurden anhand des Schemas der Reihe nach überprüft. Dabei wurde kontrolliert, ob das jeweilige Eingangssignal korrekt eingelesen beziehungsweise der entsprechende Ausgang oder Aktor richtig angesteuert wird.

Nach erfolgreicher Prüfung wurde der jeweilige Punkt direkt im Elektroschema mit «in Ordnung» und dem Prüfdatum gekennzeichnet. Damit diente das Schema gleichzeitig als Übersicht über den Fortschritt der Inbetriebnahme und als Nachweis der bereits geprüften Anschlüsse. Dieses Vorgehen entsprach auch dem im Pflichtenheft vorgesehenen Testnachweis über das Elektroschema.

Nach den konventionellen Ein- und Ausgängen wurden die Kommunikationssysteme und deren angeschlossene Geräte überprüft. Dabei wurde jeweils zuerst die einzelne Schnittstelle getestet und anschliessend kontrolliert, ob die Bedienbefehle und Rückmeldungen über den gesamten Kommunikationsweg übertragen werden.

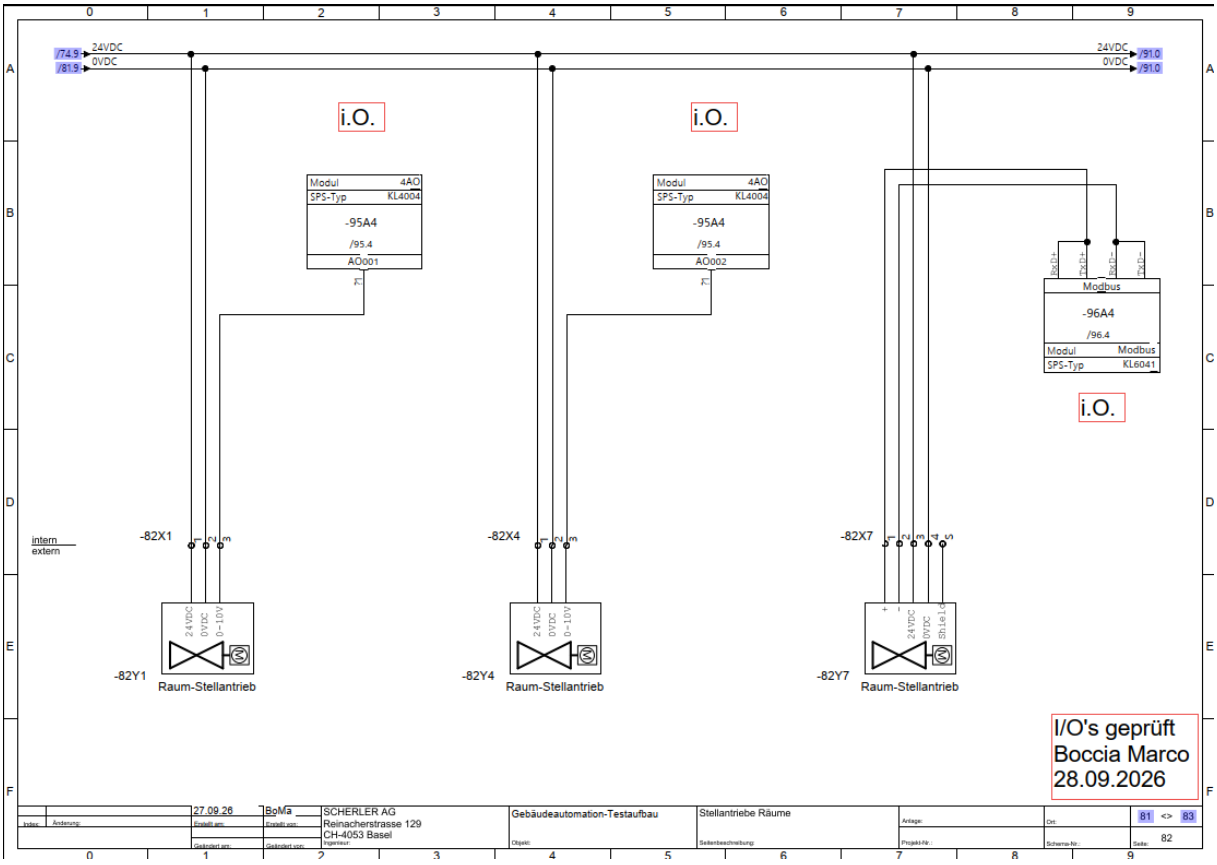



*Abbildung 53: Beispiel einer geprüften Schemaseite*

## 5.2 Prüfung der Ein- und Ausgänge

Nach der Kontrolle der Spannungsversorgung wurden die konventionellen Ein- und Ausgänge der Beckhoff-Steuerung einzeln geprüft. Ziel war es, sicherzustellen, dass die im Elektroschema vorgesehenen Signale an der richtigen Klemme anliegen und innerhalb von TwinCAT korrekt verarbeitet werden.

**Digitale Ein- und Ausgänge**

Die digitalen Ein- und Ausgänge der KL1809 und KL2809 wurden einzeln getestet. Eingänge wurden durch Betätigen beziehungsweise Simulieren des angeschlossenen Kontakts überprüft und gleichzeitig online in TwinCAT beobachtet. Bei den Ausgängen wurden die jeweiligen Signale angesteuert und anschliessend die Reaktion des angeschlossenen Geräts kontrolliert. Auf diese Weise wurden unter anderem der Durchflussmelder, die Signallampen sowie die über Relais geschalteten Pumpenausgänge überprüft. Die einzelnen DI- und DO-Kanäle konnten dabei grundsätzlich erfolgreich getestet werden.

**Temperaturmessungen**

Die PT1000-Temperaturfühler sind über die Beckhoff-Analogeingangsklemmen angeschlossen. Zur Kontrolle wurden die eingelesenen Werte in TwinCAT beziehungsweise in der WebVisualisierung betrachtet und auf plausible Temperaturwerte geprüft. Damit konnte sowohl die Verdrahtung der Sensoren als auch die korrekte Verarbeitung der Messwerte in der SPS kontrolliert werden. Die Prüfung der PT1000-Eingänge war grundsätzlich erfolgreich.

**0–10-V-Ausgänge**

Die Stellantriebe von Raum 1 und Raum 2 werden über die KL4004 mit einem 0–10-V-Signal angesteuert. Für die Funktionsprüfung wurden verschiedene Stellwerte vorgegeben und die resultierende Ausgangsspannung beziehungsweise die Bewegung der Antriebe kontrolliert.

Dadurch konnte bestätigt werden, dass die Analogausgänge grundsätzlich funktionieren und die beiden Raumstellantriebe über die SPS angesteuert werden können.

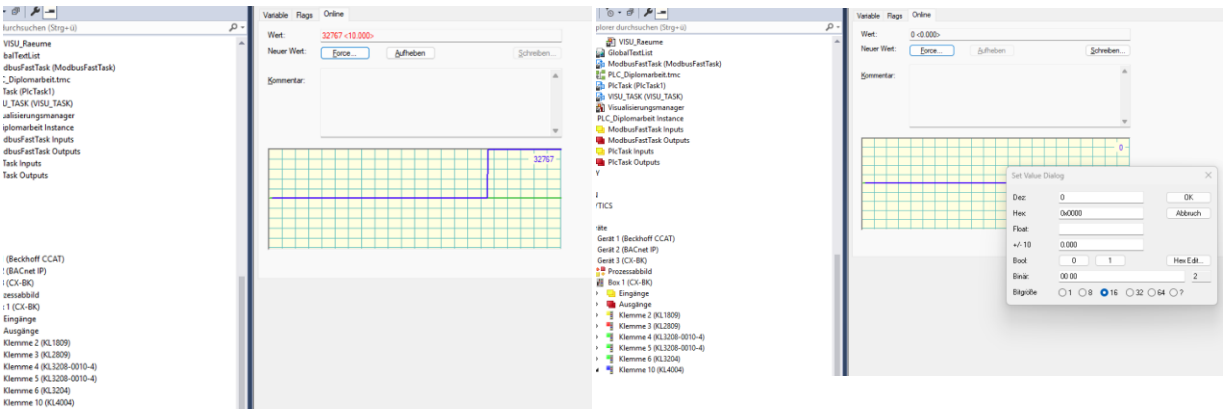


*Abbildung 54: Werteingabe zum testen direkt auf der Karte selber*

## 5.3 Prüfung der Kommunikationssysteme

Nach der Prüfung der konventionellen Ein- und Ausgänge wurden die eingesetzten Kommunikationssysteme einzeln getestet. Dabei wurde jeweils zuerst kontrolliert, ob das angeschlossene Feldgerät beziehungsweise Gateway grundsätzlich erreichbar ist. Anschliessend wurde geprüft, ob Befehle übertragen und Rückmeldungen korrekt in der SPS verarbeitet werden.

### KNX und DALI

Die KNX- und DALI-Kommunikation wurde über die Raumbeleuchtung geprüft. Die DALI-Betriebsgeräte wurden eingelesen, den jeweiligen Räumen zugeordnet und anschliessend über die KNX-Bedienung geschaltet und gedimmt. Damit konnte der Kommunikationsweg von den KNX-Bedienelementen bis zur DALI-Beleuchtung erfolgreich nachgewiesen werden.

### BACnet/IP

Für BACnet/IP wurde insbesondere die Kommunikation zwischen dem MDT-KNX-Touchpanel, dem Siemens N143 und der Beckhoff CX8191 geprüft. Nach der Erweiterung des Gateways auf insgesamt 41 BACnet-Objekte wurden die Raumbetriebsarten für alle drei Räume durchgängig getestet.

Beim Umschalten auf dem MDT wurden die Werte 0, 1, 3 und 6 von der SPS korrekt als AUTO, HEIZEN, KÜHLEN und AUS erkannt. Die zugehörigen Statuswerte konnten anschliessend wieder über BACnet und KNX an das Touchpanel zurückgemeldet werden. Damit wurde die Kommunikation in beide Richtungen nachgewiesen.

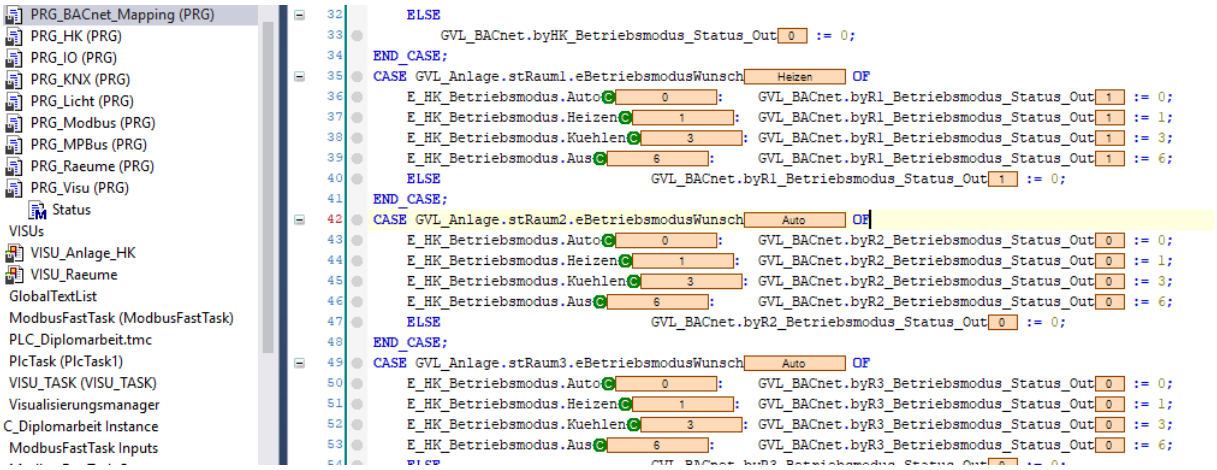



*Abbildung 55: Onlineprüfung der über BACnet/IP übertragenen Raumbetriebsarten*

### MP-Bus

Der Belimo LR24A-MP wurde über die KL6771 auf MP-Adresse 1 angesprochen. Bei der Prüfung konnten die Gerätedaten beziehungsweise die Seriennummer ausgelesen werden. Anschliessend wurden verschiedene Sollpositionen vorgegeben und die zurückgemeldete Istposition kontrolliert.

Damit konnte sowohl die Kommunikation als auch die Ansteuerung des Change-over-Antriebs über MP-Bus erfolgreich getestet werden.

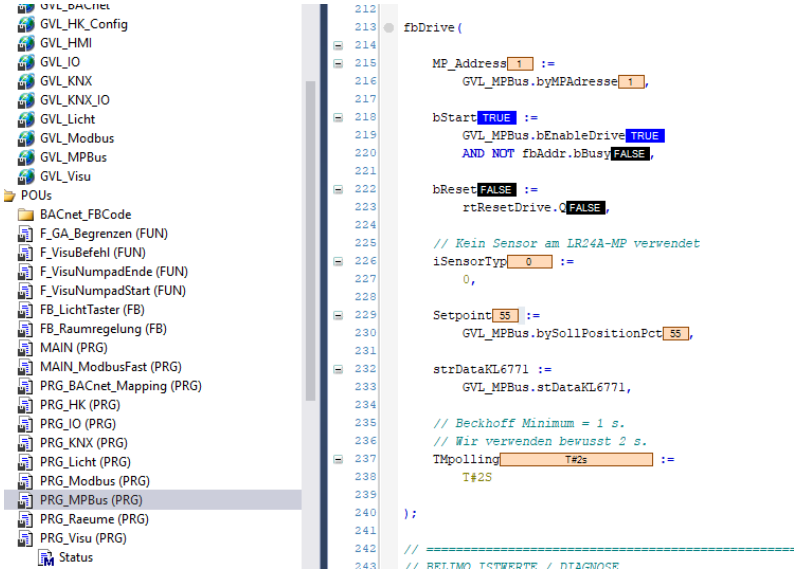



*Abbildung 56: Ansteuerung Soll Position Change-Over Stellantrieb*

### Modbus RTU

Der TA-Slider wurde über die KL6041 mit Adresse 1, 9600 Baud und 8E1 getestet. Zur Funktionskontrolle wurden Stellwerte übertragen und die Bewegung des Antriebs beobachtet. Damit konnte die grundsätzliche Modbus-RTU-Kommunikation zwischen der Beckhoff-Steuerung und dem Stellantrieb nachgewiesen werden.

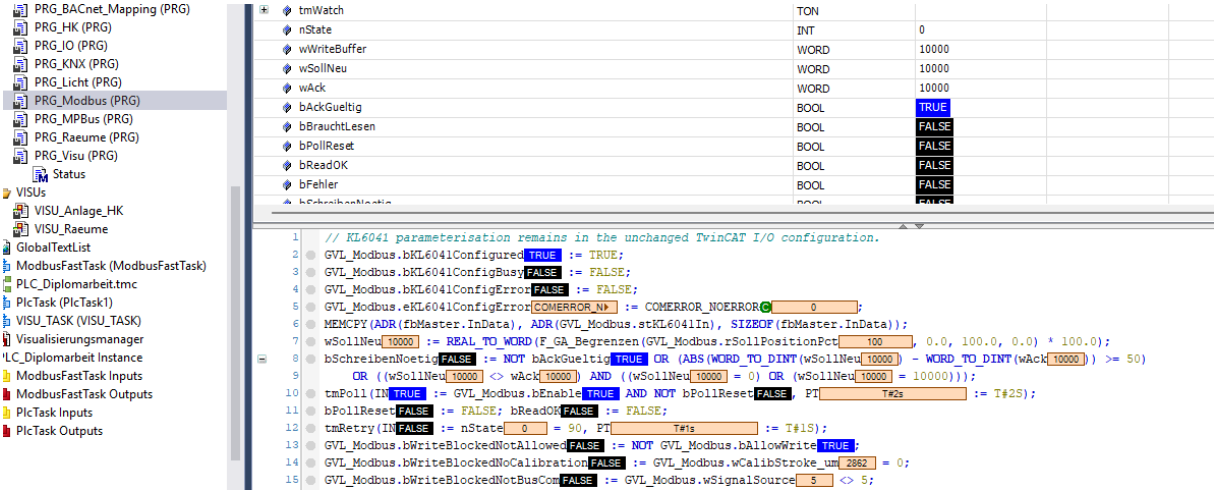



*Abbildung 57: Programmausschnitt Ansteuerung TA-Slider auf 100%*

## 5.4 Prüfung der Anlagen- und Raumfunktionen

Nach der Einzelprüfung der Ein-/Ausgänge und Kommunikationssysteme wurden die zusammenhängenden Raum- und Anlagenfunktionen getestet. Dabei stand nicht eine automatische Temperaturregelung im Vordergrund, sondern die Frage, ob ein Bedienbefehl korrekt durch die SPS verarbeitet und bis zum entsprechenden Feldgerät weitergegeben wird.

### Raumfunktionen

Für jeden der drei Räume wurden die Betriebsarten AUTO, HEIZEN, KÜHLEN und AUS über die Bedienoberflächen durchgeschaltet. Bei HEIZEN wurde kontrolliert, ob die rote Betriebsanzeige aktiviert und das zugehörige Raumventil auf 100 % angesteuert wird. Bei KÜHLEN wurde entsprechend die blaue Anzeige aktiviert und ebenfalls ein Ventilsollwert von 100 % ausgegeben. In den Betriebsarten AUTO und AUS bleibt der Raum im vereinfachten Demonstrationsbetrieb ohne Heiz- oder Kühlanforderung.

Für Raum 1 und Raum 2 wurde dabei die Ansteuerung der 0–10-V-Stellantriebe geprüft. Bei Raum 3 erfolgte die Ansteuerung des TA-Sliders über Modbus RTU. Damit konnte die gleiche Raumfunktion mit zwei unterschiedlichen Ansteuerungsarten demonstriert werden.

### Gemeinsame Heiz-/Kühlgruppe

Anschliessend wurde geprüft, wie die SPS die direkten Heiz- und Kühlwünsche der drei Räume verarbeitet. Die gewählte Anlagenrichtung wird aus der Mehrheit der aktiven Raumwünsche gebildet.

Beispielsweise ergibt sich bei zwei Heizwünschen und einem Kühlwunsch die Anlagenrichtung **Heizen**. Bei zwei Kühlwünschen wird entsprechend die Kühlrichtung gewählt. Bei einem Gleichstand beziehungsweise ohne gültige Anforderung bleibt die Anlage neutral.

In Abhängigkeit von der bestimmten Richtung werden der Change-over-Antrieb und die zugehörige Pumpe angesteuert. Der Change-over-Antrieb kann zusätzlich unabhängig davon über die WebVisu

verfahren werden. Die Pumpen sowie die Raumventile lassen sich ebenfalls direkt über die übergeordnete Bedienoberfläche prüfen.

Die automatische temperaturabhängige Raumregelung wurde im finalen Demonstrationsstand nicht umgesetzt. Die Prüfung konzentrierte sich deshalb auf die Bedienung, die Kommunikationswege und die korrekte Ansteuerung der angeschlossenen Geräte.

| Prüfung | Erwartete Reaktion |
|---|---|
| Raum auf HEIZEN | rote Anzeige EIN, Ventil 100 % |
| Raum auf KÜHLEN | blaue Anzeige EIN, Ventil 100 % |
| Raum auf AUS | Anzeigen AUS, Ventil 0 % |
| Mehrheit HEIZEN | Heizrichtung / Heizpumpe |
| Mehrheit KÜHLEN | Kühlrichtung / Kühlpumpe |
| Gleichstand | Neutral, keine Gruppenpumpe |

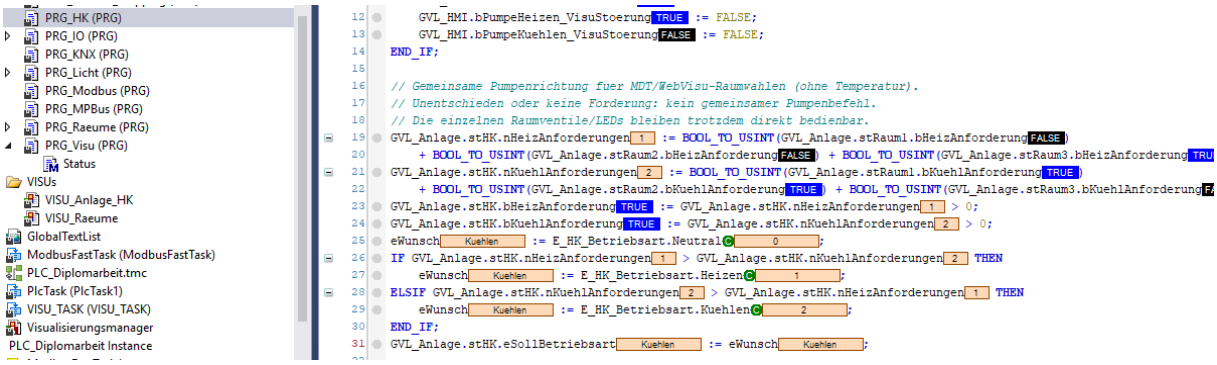



*Abbildung 58: Softwareausschnitt Onlineprüfung des Mehrheitsentscheids der drei Raumwünsche*

## 5.5 Prüfung von Bedienung und Alarmfunktionen

Neben den Anlagenfunktionen wurde auch das Zusammenspiel der verschiedenen Bedienebenen geprüft. Im normalen Zustand können die Beleuchtung und die Raumbetriebsarten über die KNX-Taster beziehungsweise das KNX-Touchpanel bedient werden. Anschliessend wurde kontrolliert, ob eine Bedienung über das übergeordnete WebVisu-Touchpanel die vorgesehene höhere Priorität übernimmt.

Bei einer Bedienung über die WebVisu wechselt die Anlage in den Zustand HAND. Während dieser Zeit werden Befehle der untergeordneten KNX-Bedienebenen gesperrt, während die Statusanzeigen weiterhin sichtbar bleiben. Mit der Funktion «Alles Auto» werden die Handvorgaben wieder aufgehoben und KNX-Touchpanel sowie KNX-Taster erneut zur Bedienung freigegeben. Dabei werden die zuvor gültigen KNX-Werte nicht durch feste Standardwerte ersetzt.

**Prüfung des Durchflussalarms**

Für die Alarmprüfung wurde die Durchflussüberwachung der Pumpen getestet. Nach dem Einschalten einer Pumpe beginnt eine Überwachungszeit von 5 Sekunden. Wird innerhalb dieser Zeit kein Durchfluss erkannt, wird ein Durchflussalarm ausgelöst und die Pumpe abgeschaltet. Der Alarm wird auf der WebVisu angezeigt.

Durch eine Quittierung wird der gespeicherte Alarm zurückgesetzt und ein neuer Startversuch ermöglicht. Besteht die Pumpenanforderung weiterhin, startet die Überwachung erneut. Wird wiederum kein Durchfluss erkannt, wird der Alarm erneut ausgelöst.

Zusätzlich wurde für Inbetriebnahme- und Demonstrationszwecke eine Alarmüberbrückung vorgesehen. Ist diese aktiviert, bleibt der fehlende Durchfluss sichtbar, die automatische Abschaltung der Pumpe wird jedoch unterdrückt. Die Alarmüberbrückung zählt als Handeingriff und wird ebenfalls durch «Alles Auto» zurückgesetzt.

| Prüfung | Erwartete Reaktion |
|---|---|
| Bedienung über WebVisu | Anlage geht auf HAND |
| KNX während HAND bedienen | Keine Wirkung |
| «Alles Auto» | HAND aufgehoben, KNX wieder freigegeben |
| Pumpe + Durchfluss vorhanden | Kein Alarm |
| Pumpe + kein Durchfluss | Nach 5s Alarm und Pumpe AUS |
| Quittierung | Neuer Startversuch möglich |
| Alarmüberbrückung | Alarm sichtbar, Pumpe wird nicht zwangsabgeschaltet |

## 5.6 Fehler, Korrekturen und Testergebnisse

Während der Inbetriebnahme traten mehrere Fehler auf, deren Ursache nicht immer direkt bei der Software oder Verdrahtung lag. Insbesondere defekte Feldgeräte erschwerten teilweise die Fehlersuche, da zunächst zwischen einem Kommunikationsproblem, einer falschen Parametrierung und einem tatsächlichen Gerätedefekt unterschieden werden musste.

**Defekte Pumpe**

Bei der ersten Inbetriebnahme einer der Pumpen trat unmittelbar beim Einschalten ein deutliches Knallgeräusch auf. Die Pumpe funktionierte anschliessend nicht ordnungsgemäss und wurde als defekt eingestuft. Für die weiteren Tests wurde die zweite vorhandene Pumpe verwendet, welche funktionierte.

Zusätzlich zeigte sich bei den ersten hydraulischen Versuchen, dass die Förderleistung bei 24 VDC für den kleinen Aufbau hoch war. Das Problem wurde relativ einfach gelöst, indem man ein Netzteil benutzt hat. Die Pumpe darf mit 8-24VDC betrieben werden und das nächstgrösste Netzteil das ich auf Anhieb fand war eins das 12VDC war.

**Temperaturfühler**

Bei der Prüfung der PT1000-Messstellen zeigten zwei Temperaturfühler keine plausiblen Werte beziehungsweise funktionierten nicht korrekt. Da die Verdrahtung und die zugehörigen Analogeingänge geprüft werden konnten, wurden die betreffenden Fühler ersetzt.

**MP-Bus**

Bei der ersten Inbetriebnahme des Belimo-Antriebs konnte zunächst keine Kommunikation aufgebaut werden. Die KL6771 meldete dabei keine Antwort des MP-Bus-Geräts.

Bei der Fehlersuche stellte sich heraus, dass die notwendige Feldversorgung der KL6771 noch nicht vorhanden war. Nach dem Anschluss der 24-VDC-Versorgung konnte der Belimo-Antrieb erkannt und auf MP-Adresse 1 angesprochen werden. Anschliessend funktionierten sowohl die Vorgabe der Sollposition als auch die Rückmeldung der Istposition.

**Modbus RTU / TA-Slider**

Auch die Inbetriebnahme des TA-Sliders verursachte einen vergleichsweisen hohen Aufwand. Mehrere getestete TA-Slider erwiesen sich als defekt beziehungsweise waren für die vorgesehenen Tests nicht verwendbar. Dadurch war zunächst nicht eindeutig, ob die Ursache bei der Modbus-Konfiguration, der Verdrahtung oder dem angeschlossenen Gerät lag.

Ein funktionierender TA-Slider wurde deshalb zuerst mit dem Herstellerwerkzeug direkt geprüft. Nachdem die Stellbewegung damit bestätigt werden konnte, wurde die Verbindung über die Beckhoff KL6041 weiter in Betrieb genommen. Mit der Geräteadresse 1 und den eingestellten Kommunikationsparametern konnte der Antrieb anschliessend über TwinCAT angesteuert werden.

**Kommunikation und Software**

Auch bei der Kommunikation zwischen der CX8191 und dem übergeordneten Touchpanel waren zu Beginn zusätzliche Einstellungen an der Steuerung notwendig. Diese wurden schrittweise angepasst, bis die WebVisualisierung über das Netzwerk zuverlässig aufgerufen werden konnte.

Bei der Software zeigte sich allgemein, dass die einzelnen Kommunikationswege zuerst separat funktionsfähig sein mussten, bevor eine Fehlersuche im Gesamtsystem sinnvoll möglich war. Dieses Vorgehen bewährte sich insbesondere bei KNX/BACnet, MP-Bus und Modbus.

**Ergebnis der Inbetriebnahme**

Nach den Korrekturen konnten die wesentlichen Kommunikations- und Ansteuerungsfunktionen des Testaufbaus nachgewiesen werden. Die konventionellen Ein- und Ausgänge, die Beleuchtung über KNX/DALI, BACnet/IP, MP-Bus, Modbus RTU sowie die Bedienung über die beiden Touchpanels konnten grundsätzlich in Betrieb genommen werden.

# 6 Technische Dokumentation

Neben dem eigentlichen Aufbau wurden während der Diplomarbeit verschiedene technische Unterlagen erstellt. Sie dienen dazu, die Verdrahtung, die Funktionsweise, die Kommunikationswege und den Softwarestand des Testaufbaus auch nach Abschluss der Diplomarbeit nachvollziehen zu können.

Die wichtigsten Unterlagen sind das Elektroschema, das hydraulische Prinzipschema, die Datenpunkt- und I/O-Dokumentation, der Funktionsbeschrieb sowie die zugehörigen Softwareprojekte. Diese Dokumente werden werden zusammen mit der Dokumentation abgegeben.

## 6.1 Elektro- und Prinzipschema

Das Elektroschema wurde mit **eXs 2025** erstellt und dokumentiert die elektrische Ausführung der Demowand. Darin enthalten sind unter anderem die Einspeisung und Absicherung, Spannungsversorgungen, Beckhoff-Steuerung und K-Bus-Klemmen, Reihenklemmen sowie die angeschlossenen Sensoren und Aktoren.

Während der Inbetriebnahme wurde das Elektroschema zusätzlich als Prüfunterlage verwendet. Erfolgreich kontrollierte Datenpunkte wurden direkt im Schema mit dem Prüfdatum und dem Vermerk «in Ordnung» gekennzeichnet.

Zusätzlich wurde ein Prinzipschema für die hydraulische Anlage erstellt. Dieses zeigt den Zusammenhang zwischen Heiz- und Kühltank, Pumpen, Change-over-Ventil, Fussbodenheizverteiler, Raumkreisen, Durchflussmelder und Temperaturmessstellen in vereinfachter Form.

## 6.2 Datenpunkt- und I/O Dokumentation

Für die SPS wurden die verwendeten Ein- und Ausgänge sowie die Kommunikationsdatenpunkte dokumentiert. Dazu gehören die konventionellen digitalen und analogen Signale sowie die über KNX, BACnet/IP, MP-Bus und Modbus RTU übertragenen Werte.

Die Dokumentation erleichtert die Zuordnung zwischen Feldgerät, physikalischem Anschluss und Softwarevariable und dient damit sowohl bei der Inbetriebnahme als auch bei späteren Erweiterungen des Testaufbaus als Orientierung.

## 6.3 Funktionsbeschrieb und Inbetriebnahmeunterlagen

Der Funktionsbeschrieb dokumentiert den finalen Funktionsumfang des Testaufbaus. Darin werden insbesondere die Bedienebenen, Kommunikationssysteme, Raumfunktionen, Heiz-/Kühlfunktionen, Bedienprioritäten und die Durchflussüberwachung beschrieben.

Dabei wird auch die Abgrenzung des finalen Demonstrationsbetriebs festgehalten. Der Schwerpunkt liegt auf der Kommunikation und Ansteuerung der vorhandenen Geräte; eine automatische Raumtemperaturregelung ist nicht Bestandteil des endgültigen Demonstrationsstands.

Der tatsächliche Nachweis der elektrischen Datenpunkte erfolgte hauptsächlich über die Einträge im Elektroschema. Ergänzend können die Funktionsprüfungen und festgestellten Abweichungen über die vorhandenen IBN-Unterlagen nachvollzogen werden.

## 6.4 Software- und Projektunterlagen

Neben den technischen Dokumenten gehören auch die erstellten Engineering-Projekte zur Projektdokumentation. Dazu zählen insbesondere:

- TwinCAT-3-Projekt der Beckhoff CX8191
- ETS-6-Projekt der KNX-Anlage
- BACnet-Konfiguration des Siemens N143
- eXs-Elektroschema
- Prinzipschema
- Funktionsbeschrieb
- Datenpunkt- und I/O-Unterlagen
- verwendete Herstellerunterlagen und Datenblätter

Der vollständige SPS-Code wird nicht im Hauptteil der Diplomarbeit abgedruckt. Interessante Ausschnite der Software wurden rausgesucht und erläutert. Die vollständigen Projektdateien werden zusammen mit den übrigen technischen Unterlagen bei der SCHERLER abgelegt, sodass der Aufbau später weiterbearbeitet und erweitert werden kann.

# 7 Reflexion und Projektbewertung

Die Umsetzung des Gebäudeautomation-Testaufbaus war deutlich umfangreicher als ursprünglich angenommen. Neben der technischen Umsetzung mussten während des Projekts zahlreiche mechanische, elektrische und organisatorische Herausforderungen gelöst werden. Im folgenden Kapitel werden die erreichten Ziele, die Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Planung sowie die wichtigsten persönlichen und fachlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

## 7.1 Zielerreichung

Das Hauptziel der Diplomarbeit war die Planung, der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Gebäudeautomation-Testaufbaus, mit welchem verschiedene Kommunikationssysteme und Feldgeräte praxisnah miteinander verbunden und demonstriert werden können.

Dieses Ziel wurde aus meiner Sicht erreicht. Es entstand eine vollständig aufgebaute Demowand, welche sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite einen übersichtlichen und funktionsfähigen Aufbau zeigt. Besonders wichtig war für mich, dass nicht nur einzelne Komponenten montiert wurden, sondern diese auch tatsächlich miteinander kommunizieren und über verschiedene Bedienebenen angesteuert werden können.

Die Beleuchtung der drei Räume kann über KNX beziehungsweise DALI bedient werden. Das KNX-Touchpanel und das übergeordnete WebVisu-Touchpanel sind funktionsfähig und ermöglichen die Bedienung beziehungsweise Darstellung der verschiedenen Raum- und Anlagenfunktionen. Zusätzlich konnten BACnet/IP, MP-Bus, Modbus RTU sowie konventionelle digitale und analoge Ein- und Ausgänge in den Aufbau integriert und getestet werden.

Ein ursprünglich weiterführendes Ziel war die Umsetzung einer automatischen Raumtemperatur- und Heiz-/Kühlregelung. Diese konnte innerhalb des verfügbaren Projektzeitraums nicht mehr vollständig umgesetzt werden. Im finalen Demonstrationsbetrieb liegt der Schwerpunkt deshalb auf der Kommunikation, Bedienung und direkten Ansteuerung der Feldgeräte. Die vorhandene Hardware und Softwarestruktur ermöglichen es jedoch, die Regelungsfunktionen später weiter auszubauen.

Trotz dieses nicht abgeschlossenen Erweiterungspunktes bewerte ich das Ergebnis der Diplomarbeit sehr positiv. Besonders zufrieden bin ich damit, dass der Aufbau heute tatsächlich funktioniert und die verschiedenen Komponenten sichtbar miteinander zusammenarbeiten. Gerade bei den Touchpanels und der Beleuchtung war es für mich ein gutes Gefühl zu sehen, dass die zuvor geplanten Funktionen am fertigen Aufbau umgesetzt werden konnten.



*Abbildung 59:Vorderwand Jetzt*

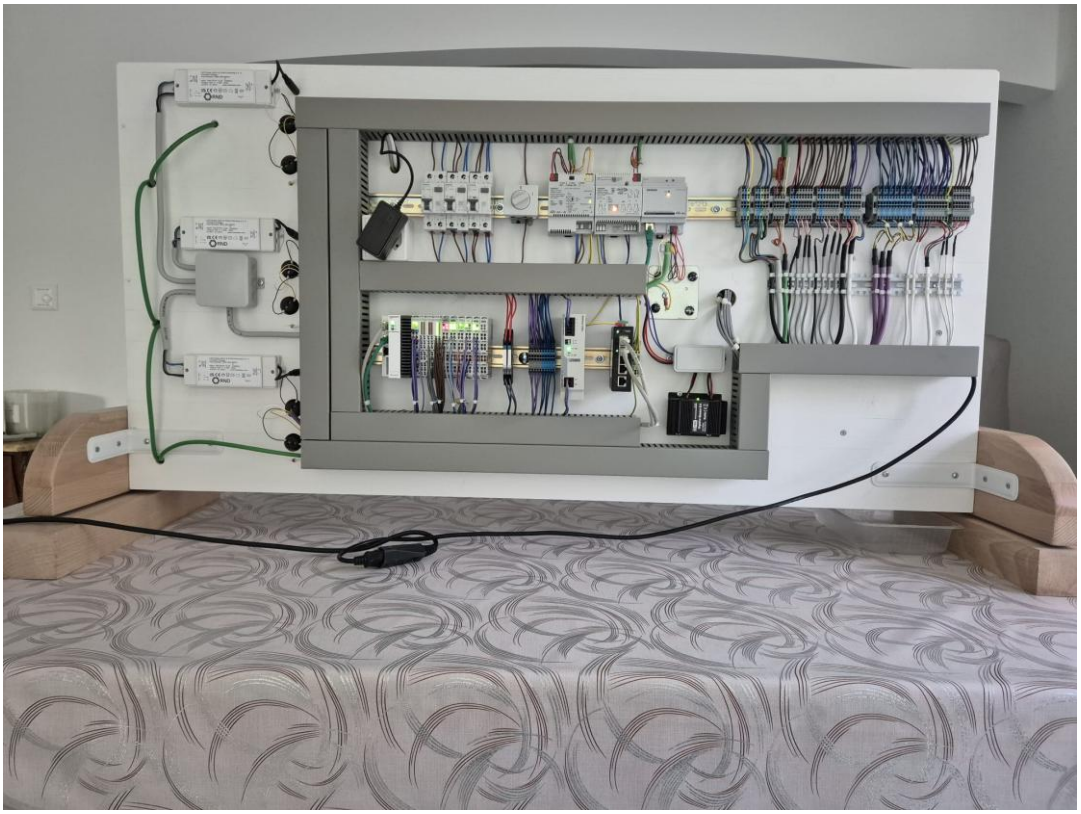


*Abbildung 60:Rückwand Jetzt*

## 7.2 Soll-/Ist-Vergleich

Für die Diplomarbeit war ursprünglich ein Arbeitsumfang von 240 Stunden vorgesehen. Bereits während der ersten Projektwochen zeigte sich jedoch, dass der tatsächliche Aufwand deutlich höher ausfallen würde. Bis zum Abschluss wurden deutlich über 400 Stunden in die Planung, den Aufbau, die Programmierung, Inbetriebnahme und Dokumentation investiert.

Die grösste Abweichung entstand beim praktischen Aufbau der Demowand. Der mechanische Aufwand wurde zu Beginn deutlich unterschätzt. Zusätzliche Verstärkungen, Befestigungen und Anpassungen waren notwendig, damit die Konstruktion ausreichend stabil wurde. Gleichzeitig musste während des Aufbaus mehrfach zusätzliches Material beschafft werden. Lieferzeiten führten ebenfalls dazu, dass verschiedene Arbeiten nicht wie ursprünglich geplant nacheinander ausgeführt werden konnten. Stattdessen mussten mehrere Arbeitspakete parallel bearbeitet werden.

Auch die Erstellung des Elektroschemas beanspruchte wesentlich mehr Zeit als vorgesehen. Mit eXs hatte ich zuvor noch nicht gearbeitet und auch ein vollständiges Elektroschema hatte ich bis zu diesem Projekt noch nie selbst erstellt. Zusätzlich erschwerten Probleme mit dem Benutzerkonto, Softwareupdates und benötigten Freigaben den Einstieg.

Ein weiterer erheblicher Aufwand entstand bei der Inbetriebnahme und Programmierung. Da mehrere unterschiedliche Kommunikationssysteme eingesetzt wurden, mussten KNX, DALI, BACnet/IP, MP-Bus und Modbus jeweils einzeln eingerichtet und getestet werden. Defekte Komponenten führten teilweise zu zusätzlicher Fehlersuche, da zunächst nicht eindeutig war, ob die Ursache bei der Software, der Kommunikation, der Verdrahtung oder beim jeweiligen Gerät lag.

Durch den höheren Aufwand musste der Projektumfang gegen Ende priorisiert werden. Der Schwerpunkt wurde auf einen funktionsfähigen Demonstrationsbetrieb mit Kommunikation, Bedienung und Ansteuerung der vorhandenen Geräte gelegt. Die ursprünglich zusätzlich vorgesehene automatische Raumtemperatur- und Heiz-/Kühlregelung wurde deshalb nicht mehr vollständig umgesetzt.

Rückblickend war der geplante Aufwand von 240 Stunden für den tatsächlich entstandenen Funktionsumfang zu knapp bemessen. Insbesondere die Erweiterung des ursprünglichen Konzepts während der Planung erhöhte sowohl den mechanischen als auch den elektrischen und softwaretechnischen Aufwand deutlich.

| **Bereich** | **Ursprüngliche Einschätzung** | **Tatsächlicher Verlauf** |
|---|---|---|
| Gesamtaufwand | 240h | 400h |
| Mechanischer Aufbau | Vergleichsweise kleiner Anteil | Wesentlich höherer Aufwand |
| Materialbeschaffung | Früh abschliessbar | Wiederholte Nachbestellungen und Lieferzeiten |
| Elektroschema | Bestandteil der Planung | Hoher Einarbeitungs- und Erstellungsaufwand |
| Software | Nach Hardwareaufbau | Parallel zu Aufbau und IBN |
| Inbetriebnahme | Gegen Projektende | Laufend des Projekts UND gegen Projektende |

## 7.3 Wesentliche Projektänderungen und Herausforderungen

Eine der grössten Veränderungen während der Diplomarbeit war die Erweiterung des ursprünglich geplanten Aufbaus. Zu Beginn war eine deutlich einfachere Heiz-/Kühlgruppe mit zwei Tanks, Pumpen und wenigen Feldgeräten vorgesehen. Im Verlauf der Planung kamen unter anderem der Fussbodenheizverteiler mit drei Raumstellantrieben, zusätzliche Temperaturmessstellen, weitere Kommunikationssysteme und das übergeordnete Touchpanel hinzu. Einige dieser ursprünglich als Erweiterungen vorgesehenen Funktionen mussten bereits früh berücksichtigt werden, da ein späterer mechanischer Umbau zusätzliche Bohrungen und Anpassungen an der fertigen Wand verursacht hätte.

Eine weitere Herausforderung war der mechanische Aufbau. Zu Beginn war für mich nicht vollständig abschätzbar, wie viele zusätzliche Verstärkungen, Montageplatten und Befestigungselemente notwendig sein würden. Während des Aufbaus mussten deshalb mehrfach zusätzliche Materialien beschafft und Lösungen zur Stabilisierung der Wand gefunden werden. Dadurch stieg der Zeitaufwand gegenüber der ursprünglichen Planung deutlich an.

Auch die Erstellung des Elektroschemas war für mich eine neue Aufgabe. Mit eXs hatte ich zuvor nicht gearbeitet und ein vollständiges Schema dieser Grössenordnung hatte ich noch nie selbst erstellt. Zusätzlich erschwerten Probleme mit dem Benutzerkonto, notwendige Softwareupdates und Freigaben den Einstieg. Dadurch beanspruchte dieser Teil wesentlich mehr Zeit als erwartet.

Während der Inbetriebnahme kamen weitere Schwierigkeiten hinzu. Eine Pumpe war bereits beim ersten Einschalten defekt, zwei Temperaturfühler mussten ersetzt werden und bei mehreren TA-Slidern stellte sich heraus, dass die Geräte nicht wie vorgesehen verwendet werden konnten. Besonders bei Kommunikationsproblemen war dadurch nicht immer sofort ersichtlich, ob die Ursache in der Verdrahtung, Parametrierung, Software oder im angeschlossenen Feldgerät lag.

Gegen Ende der Diplomarbeit musste deshalb stärker priorisiert werden. Der Schwerpunkt wurde auf einen zuverlässig demonstrierbaren Aufbau gelegt, bei dem die vorhandenen Geräte über KNX-Taster, KNX-Touchpanel und WebVisu bedient werden können und die eingesetzten Kommunikationssysteme funktionieren. Die vollständige automatische Raumtemperatur- und Heiz-/Kühlregelung wurde zugunsten dieses stabilen Demonstrationsstands zurückgestellt.

## 7.4 Lessons Learned

Die Diplomarbeit war für mich fachlich und persönlich sehr lehrreich. Durch den breiten Aufbau musste ich mich mit mehreren Themen auseinandersetzen, mit denen ich zuvor nur teilweise oder noch gar nicht gearbeitet hatte.

Besonders viel konnte ich im Bereich der Gebäudeautomation dazulernen. Mein Verständnis für KNX, TwinCAT 3 und die verschiedenen Kommunikationssysteme hat sich deutlich verbessert. Durch die praktische Inbetriebnahme wurde für mich nachvollziehbarer, wie Bussysteme eingerichtet, geprüft und bei Kommunikationsproblemen systematisch untersucht werden können.

Auch die Erstellung des Elektroschemas mit eXs war für mich eine neue Erfahrung. Zu Beginn war die Arbeit mit der Software ungewohnt und zusätzlich durch technische Probleme erschwert. Im Verlauf des Projekts lernte ich jedoch, ein umfangreicheres Elektroschema selbstständig aufzubauen und für die spätere Verdrahtung und Inbetriebnahme zu verwenden.

Neben den technischen Themen kamen viele praktische Arbeiten hinzu, mit denen ich vorher kaum Erfahrung hatte. Dazu gehörten beispielsweise der Holzaufbau, das Streichen der Wand, die

mechanische Stabilisierung sowie die Verrohrung der Heiz-/Kühlgruppe. Gerade diese Arbeiten zeigten mir, wie stark der tatsächliche Montageaufwand von einer ersten Planung abweichen kann.

Die elektrische Montage und Verdrahtung waren für mich hingegen vertrauter, da ich ausgebildeter Montageelektriker bin. Dieser Teil gab mir während des Projekts immer wieder einen Bereich, in dem ich auf vorhandene Erfahrung zurückgreifen konnte.

Die wichtigste Erkenntnis für zukünftige Projekte betrifft jedoch die Planung. Rückblickend würde ich versuchen, die grundlegende Planung möglichst früh und konsequent abzuschliessen. Insbesondere die Positionierung der Komponenten, der mechanische Aufbau, die benötigten Materialien sowie die Schnittstellen sollten so früh wie möglich festgelegt werden. Dadurch könnten spätere Umbauten, zusätzliche Bestellungen und Zeitverluste reduziert werden.

Gleichzeitig hat mir die Arbeit gezeigt, dass bei einem technischen Projekt trotz guter Planung immer unerwartete Probleme auftreten können. Entscheidend ist deshalb, Fehler schrittweise einzugrenzen und nicht mehrere mögliche Ursachen gleichzeitig zu verändern. Dieses Vorgehen hat sich insbesondere bei den verschiedenen Kommunikationssystemen und während der Inbetriebnahme bewährt.

## 7.5 Verbesserungspotential und Ausblick

Auch nach Abschluss der Diplomarbeit bietet der Gebäudeautomation-Testaufbau weiteres Ausbaupotential. Die vorhandene Hardware und die bereits funktionierenden Kommunikationsschnittstellen ermöglichen es, die Software zu einem späteren Zeitpunkt weiterzuentwickeln, ohne dass der mechanische oder elektrische Aufbau grundsätzlich verändert werden muss.

Das grösste Verbesserungspotential liegt in der noch nicht vollständig umgesetzten automatischen Raumtemperatur- und Heiz-/Kühlregelung. Die notwendigen Raumtemperaturfühler, Ventilantriebe, Pumpen und der Change-over-Antrieb sind bereits vorhanden. Durch eine Erweiterung der TwinCAT-Software könnten daraus später reale Regelkreise aufgebaut und verschiedene Regelstrategien miteinander verglichen werden.

Auch die bestehende WebVisualisierung kann bei Bedarf erweitert werden. Zusätzliche Diagnosefunktionen, Trendanzeigen oder weitere Betriebszustände könnten ergänzt werden, wenn diese für spätere Versuche benötigt werden.

Ein wichtiger Vorteil des Testaufbaus ist, dass er nicht ausschliesslich für die fest montierten Komponenten verwendet werden muss. Über die vorhandenen Kommunikationsschnittstellen und Ein-/Ausgänge können weitere Feldgeräte angeschlossen und getestet werden. Dadurch kann die Wand beispielsweise dazu genutzt werden, neue Geräte, Kommunikationswege oder Softwarefunktionen vor dem Einsatz in einem realen Projekt auszuprobieren.

Nach Abschluss der Diplomarbeit soll der Aufbau deshalb weiterhin als Lern- und Testplattform eingesetzt werden. Neben eigenen Versuchen kann er auch zur Ausbildung von Lernenden oder zur Demonstration von Gebäudeautomationsfunktionen gegenüber anderen Personen verwendet werden.

# 8 Schluss

## 8.1 Persönliches Schlusswort

Rückblickend war diese Diplomarbeit für mich ein sehr intensives, aber auch äusserst lehrreiches Projekt. Der tatsächliche Aufwand war deutlich höher, als ich zu Beginn erwartet hatte. Gerade gegen Ende war die verfügbare Zeit knapp und ich musste entscheiden, welche Funktionen für einen stabilen Demonstrationsbetrieb noch umgesetzt werden konnten und welche zu einem späteren Zeitpunkt weitergeführt werden.

Trotzdem empfinde ich die Diplomarbeit als grossen Erfolg. In der fertigen Demowand steckt sehr viel Zeit und Arbeit, und es ist für mich besonders zufriedenstellend, das entstandene Ergebnis sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite zu sehen. Dass die Touchpanels funktionieren, die Beleuchtung wie geplant bedient werden kann und die unterschiedlichen Kommunikationssysteme mit der Beckhoff-Steuerung zusammenarbeiten, zeigt mir, dass sich der grosse Aufwand gelohnt hat.

Fachlich konnte ich während der Arbeit besonders meine Kenntnisse in TwinCAT 3 und KNX erweitern. Gleichzeitig musste ich mich mit BACnet/IP, MP-Bus, Modbus RTU, DALI sowie verschiedenen Feldgeräten auseinandersetzen. Mit eXs erstellte ich erstmals selbst ein umfangreicheres Elektroschema. Auch die mechanischen Arbeiten, das Streichen und die Verrohrung waren für mich neue Erfahrungen. Die elektrische Montage und Verdrahtung waren dagegen ein Bereich, in dem ich auf meine bisherige Ausbildung und Berufserfahrung zurückgreifen konnte.

Besonders wertvoll ist für mich, dass der Testaufbau nach Abschluss der Diplomarbeit weiterverwendet werden kann. Die automatische Regelung kann später noch ergänzt und die Wand für weitere Geräte, Schnittstellen und Versuche eingesetzt werden. Damit endet das Projekt für mich nicht mit der Abgabe der Diplomarbeit.

Wenn ich ein ähnliches Projekt nochmals durchführen würde, würde ich vor allem versuchen, die grundlegende Planung wesentlich früher vollständig abzuschliessen und mehr Zeitreserven für unerwartete Probleme vorzusehen. Insgesamt nehme ich aus der Diplomarbeit jedoch sehr viel neues Wissen und die Erfahrung mit, dass ich einen solchen umfangreichen Aufbau von der ersten Idee bis zu einem funktionierenden Demonstrationssystem selbst umsetzen kann, aber gerne beim nächsten Mal vorzugsweise mit etwas weniger Zeitdruck.

## 8.2 Verdankung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderster Dank gilt meiner Familie. Sie hat mich während der gesamten Diplomarbeit stark unterstützt und mir insbesondere in den sehr zeitintensiven und stressigen Phasen den nötigen Rückhalt gegeben. Ohne diese Unterstützung wäre die Umsetzung der Arbeit in diesem Umfang deutlich schwieriger gewesen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dr. Lukas Kurmann für die Betreuung der Diplomarbeit, die fachlichen Rückmeldungen und die Unterstützung während des Projektverlaufs bedanken.

Mein Dank gilt zudem Tobias Reinhardt für die fachliche Begleitung seitens der SCHERLER AG und die Unterstützung bei technischen Fragestellungen.

Weiter bedanke ich mich bei der SCHERLER AG, welche mir die Durchführung dieser Diplomarbeit ermöglicht und verschiedene Beckhoff- und KNX-Komponenten für den Testaufbau zur Verfügung gestellt hat.

# 9 Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst habe. Alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel wurden im Literaturverzeichnis angegeben. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort / Datum _____

Unterschrift _____

# 10 Disclaimer

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurde ChatGPT (OpenAI, GPT-5.6 Sol) unterstützend eingesetzt. Die KI wurde ausschliesslich verwendet, um erste Textentwürfe zu strukturieren, sprachliche Formulierungen zu verbessern oder Recherchen zu unterstützen. Alle inhaltlichen Entscheidungen, Bewertungen und Schlussfolgerungen wurden von dem Verfasser selbst getroffen!

# 11 Glossar

| | |
|---|---|
| AI | Analog Input / Analogeingang |
| AO | Analog Output / Analogausgang |
| BACnet | Building Automation and Control Network |
| BACnet/IP | BACnet-Kommunikation über Internet Protocol |
| CHF | Schweizer Franken |
| CPU | Central Processing Unit / zentrale Verarbeitungseinheit |
| DALI | Digital Addressable Lighting Interface |
| DC | Direct Current / Gleichstrom |
| DI | Digital Input / Digitaleingang |
| DIN | Deutsches Institut für Normung; im Dokument bei DIN-Schienen |
| DO | Digital Output / Digitalausgang |
| ETS | Engineering Tool Software zur KNX-Projektierung |
| EVG | Elektronisches Vorschaltgerät |
| FB | Funktionsbaustein |
| FI/LS | Fehlerstrom-/Leitungsschutzschalter |
| GVL | Global Variable List / globale Variablenliste in TwinCAT |
| HF | Höhere Fachschule |
| HK | Heizung/Kühlung |
| HLK | Heizung, Lüftung, Klima |
| IBN | Inbetriebnahme |
| I/O | Input/Output / Ein- und Ausgänge |
| IP | Internet Protocol |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KNX | Standardisiertes Bussystem für die Gebäudeautomation |
| LED | Light Emitting Diode / Leuchtdiode |
| MP-Bus | Multi-Point Bus |
| PDF | Portable Document Format |
| PIR | Passive Infrared / Passiv-Infrarot |
| PRG | Program / Programmbaustein in TwinCAT |
| PT1000 | Platin-Widerstandstemperaturfühler mit 1000 Ω bei 0 °C |
| RTU | Remote Terminal Unit; Übertragungsart von Modbus RTU |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| VAC | Volt Alternating Current / Volt Wechselspannung |
| VAV | Variable Air Volume / variabler Volumenstrom |
| VDC | Volt Direct Current / Volt Gleichspannung |
| VISU | Visualisierung |
| WebVisu | WebVisualisierung der TwinCAT-Steuerung |

# 12 Anhänge

- Pflichtenheft
- Funktionbeschrieb
- Prinzipschema
- Elektroschema
- Systemtopologie
- Sytemtopologie mit Adressen
- Systemtopologie mit Kommunikationsrichtungen
- Zeitplanung
- Lernjournal
- Elektroschema Funktionskontrolle IO’s
- Datenpunktliste
- Datenblätter montierte Geräte
- Datenblätter Werkzeugtools
- Bilder
- Videos
- Einkaufsliste