HAW HAMBURG

BACHELORTHESIS
Bela Jürgens

Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Interlocksystems mit Sensorik zum sicheren Betrieb eines Detektortestaufbaus für die Hochenergiephysik

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department of Information and Electrical Engineering

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG
Hamburg University of Applied Sciences

Bela Jürgens

Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Interlocksystems mit Sensorik zum sicheren Betrieb eines Detektortestaufbaus für die Hochenergiephysik

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

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Michael Erhard (HAW)
Zweitgutachter: Dr. Andreas Mussgiller (DESY)

Eingereicht am: 02. Januar 2023

Bela Jürgens

Thema der Arbeit

Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Interlocksystems mit Sensorik zum sicheren Betrieb eines Detektortestaufbaus für die Hochenergiephysik

Stichworte

Sicherheitssystem, Taupunkt, Interlock, Finite State Machine, SPS

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der konzeptionellen Entwicklung eines automatisierten Sicherheitssystems für einen Detektortestaufbau im Rahmen des Compact Muon Solenoid (CMS) Phase II Tracker Upgrades. Zum Schutz der licht- und feuchtigkeitssensiblen Testobjekte wird durch die geeignete Auswahl und Installation von Hardware sowie der Programmierung von Überwachungs- und Steuerungssoftware ein auf Interlocks basierendes Sicherheitssystem entwickelt. Dieses System wird die Testobjekte vor Beschädigung schützen und eine erfolgreiche Testreihe ermöglichen. Das Softwarekonzept basiert auf dem Zusammenspiel von Finite State Machine (FSM) und Software Interlock (SI) über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die mit Hilfe der Auslese der Sensoren die Steuerung der Aktoren strukturieren. Für den Testaufbau werden unter anderem Sensoren für relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Durchfluss und Taupunkt verwendet sowie Kontaktsensoren für die Tür des Teststandes. Durch die Aktoren wird der Testprozess gestartet, die Testbedingungen hergestellt und der sichere Betrieb gewährleistet. Anschließende Softwaretests werden als Proof of Concept durchgeführt und ein Testskript für die Weiterentwicklung zur Verfügung gestellt. Die Hardware wird anhand einer Testbox getestet, die den Testaufbau in kleinerem Maßstab simuliert.

Bela Jürgens

Title of Thesis

Development and construction of an automated interlock system with sensor technology for the safe operation of a detector test setup for high-energy physics

Keywords

safety system, dew point, interlock, finite state machine, PLC

Abstract

This thesis focuses with the conceptual development of an automated security system for a detector test setup in the context of the CMS Phase II Tracker Upgrade. An interlock-based security system will be developed to protect the light and moisture sensitive test objects through the appropriate selection and installation of hardware and the programming of monitoring and control software. This system will protect the test objects from damage and enable a successful test series. The software concept is based on the interaction of a Finite State Machine (FSM) and Software Interlocks (SI) via a Programmable Logic Controller (PLC), which structure the control of the actuators by reading out the sensors. Sensors for relative humidity, temperature, flow and dew point, among others, are used for the test setup, as well as contact sensors for the door of the test stand. The actuators start the test process, establish the test conditions and ensure safe operation. Subsequent software tests are carried out as a proof of concept and a test script is provided for further development. The hardware is tested using a test box that simulates the test setup on a smaller scale.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungen

T_d Taupunkttemperatur.

BSI Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.

CERN Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire.

CMS Compact Muon Solenoid.

CP Communication Processor.

CPU Central Processing Unit.

DAF Detector Assembly Facility.

DESY Deutsches Elektronen-Synchroton.

FPGA Field Programmable Gate Array.

FSM Finite State Machine.

GUI Graphical User Interface.

LHC Large Hadron Collider.

MARTA Monoblock Approach for a Refrigeration Technical Application.

OB Organisations-Block.

PCB Printed Circuit Board.

RFID Radio-Frequency Identification.

RH relative Feuchtigkeit.

RTD Resistance Temperature Detector.

SCL Structed Control Language.

SI Software Interlock.

SPS speicherprogrammierbare Steuerung.

TEDD Tracker Endcap Double-Disks.

TI Temperatur Input.

UML Unified Modeling Language.

1 Einleitung

Diese Ausarbeitung wurde am Forschungszentrum Deutsches Elektronen-Synchroton (DESY) Hamburg in einer Gruppe des Fachbereichs Hochenergiephysik erarbeitet. Die Abteilung am DESY arbeitet, zusammen mit anderen Instituten, am Upgrade des CMS Detektors am Large Hadron Collider (LHC) am Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) in Genf (Schweiz). Im Jahre 2012 gelang den beiden LHC Experimenten CMS und Atlas der Nachweis des Higgs-Teilchens. Um das CMS Experiment fit für den neuen High Luminosity LHC (HL-LHC) zu machen, werden umfangreiche Upgradearbeiten an allen Subdetektoren durchgeführt. Der Spurdetekter wird dabei komplett ausgetauscht [1].

1.1 Motivation

Die CMS-Gruppe in Hamburg ist hauptsächlich für die Planung, Produktion und Tests der Spurdetektor Endkappen (Tracker Endcap Double-Disks (TEDD)) verantwortlich, welche die Schlussstücke des Detektors bilden (Abb. 1.1). Die TEDD hat einen Durchmesser von 2,2 m mit einer Länge von 1,4 m. Der neue Spurdetektor wird mit Detektormodulen versehen, die wiederum jeweils aus zwei Detektionslagen bestehen. Es werden zwei Typen von Modulen gebaut, das PS-Modul besteht aus einer Lage Pixel und einer Lage Streifensensoren, während als 2S-Module aus zwei Lagen Streifensensoren besteht. Die Sensormodule zeichnen die Bahn der Teilchen nach der Kollision im Zentrum des Detektors auf dem Weg nach außen auf (Abbildung 1.2). Jede der zwei Endkappen besteht aus fünf Doppelscheiben (Double Disks) und eine Scheibe (Disk) besteht aus zwei Halbscheiben (Dees). Auf der Disk sind die Sensormodule kreisförmig um einen runden Einschnitt in der Mitte gruppiert, durch diesen läuft im Detektor das Strahlrohr des Beschleunigers. Dabei bestehen die inneren fünf Reihen aus PS-Module, die 2S-Module bilden die äußeren drei Reihen. Das Trägermaterial einer Dee besteht aus zwei Platten eines kohlefaserverstärkten Kunststoffes, die eine Schicht Hartschaumstoff verbindet. In

diesem Schaumstoff sind die Kühlrohre eingebettet, welche, von außen mit Kühlmittel versorgt, die Sensormodule während des Betriebs kühlen. Die Kühlrohre sind dabei in sechs Sektoren aufgeteilt, die unabhängig voneinander mit CO_2 versorgt werden. Diese Aufteilung in Sektoren ist notwendig, da bei der Verdampfungskühlung die Länge der Rohre durch die Wärmelast und den Rohrdurchmesser begrenzt ist.

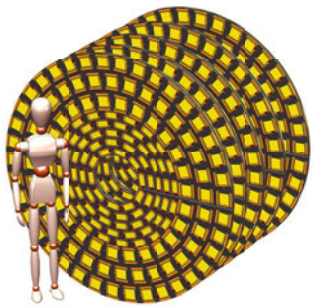

Abbildung 1.1: Komplette TEDD mit 1,80m großer Figur als Vergleich.

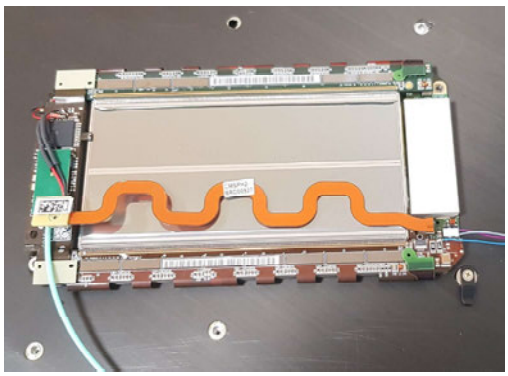

Abbildung 1.2: PS-Modul.

1.2 Rahmenbedingungen

Die Detektor Endkappen werden am DESY in der Detector Assembly Facility (DAF) montiert und im Anschluss an das CERN geschickt, um dort im Rahmen des Upgrades in den CMS Detektor eingebaut zu werden. Vor dem Versand müssen alle Komponenten der Endkappen auf Funktionalität getestet werden, was in der DAF in einem Reinraum nach ISO-7 [2] durchgeführt wird. Einer der Tests, der sogenannte Sektortest inklusive der dazugehörigen Peripherie sind die Ausgangslage dieser Arbeit. Der Aufbau des Tests gleicht einer großen Kühlkammer, welche isoliert und abgedichtet wird, um Luft- und Wärmeaustausch mit der Umgebung zu verhindern. Im Inneren der Kammer wird eine Umgebung geschaffen, die den Realbedingungen im Detektor entspricht. Dies bezieht sich auf die Temperatur (ϑ), die relative Feuchtigkeit (RH), den daraus resultierenden Taupunkt beziehungsweise die Taupunkttemperatur (T_d) und die Beleuchtung (siehe Tabelle 1.1). Um die Bedingungen herzustellen, unter denen ein Sektortest möglich ist und diese während des Testbetriebs zu überwachen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein automatisiertes Sicherheitssystem konzeptionell entwickelt und software- sowie hardwareseitig implementiert, damit so der sichere Betrieb des Sektortests gewährleistet werden kann.

Der Betrieb kann als sicher angesehen werden, wenn auf Bedingungen, die zur Beschädigung der Sensormodule führen könnten, zeitnah reagiert wird und Maßnahmen eingeleitet werden, die in einen abgesicherten, stabilen Zustand bezüglich Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Lichteinfall führen.

Tabelle 1.1: Realbedingungen am Teststand.

Beschreibung	Zielwert
Temperatur in den Kühlrohren zur Kühlung der Sensormodule	-35°C
Temperatur der umgebenden Luft im Inneren des Teststandes	-20°C
Taupunkt im Teststand im Betriebszustand	-45°C T_d (max.-40°C)
Beleuchtung und Lichteinfall	abgedunkelt
Taupunkt im umgebenden Reinraum (ϑ = 20°C ±1°C, RH = 45% ±15%)	7,7°C T_d ± 6°C T_d

Im Sektortest wird die korrekte thermische Anbindung der Module an das Kühlsystem getestet. Als Kühlaggregat (Chiller) wird ein CO_2-Verdampfungskühler genutzt, welcher Monoblock Approach for a Refrigeration Technical Application (MARTA) genannt wird und am CERN entwickelt wurde [3]. Die Kühlleistung des Aggregats reicht aufgrund der Wärmelast des Sensormodule für die Versorgung von einem der sechs Sektoren der Dee aus, welche daher nacheinander an die Kühlung angeschlossen und getestet werden. Zusätzlich werden die PS- und 2S-Sensormodule des jeweiligen Sektors geprüft, wozu eine Niedrigvoltversorgung (LV) [4] und Hochvoltversorgung (HV) [5] von CAEN SpA (Viareggio, Italien) genutzt wird. Des Weiteren wird eine Trockenluftversorgung und eine wassergekühlte Kältemaschine der Firma Huber zum Kühlen des Teststandes angeschlossen [6]. Der MARTA, die CAEN-Spannungsversorgung, der Huber und die Trockenluftversorgung haben direkten Einfluss auf die Unversehrtheit der Sensormodule und werden deshalb als kritische Aktoren klassifiziert. Die Spezifikationen der erwähnten Geräte werden in Tabelle 1.2 aufgelistet.

Der Sektortest wird im geschlossenen Zustand durchgeführt, um die mit Sensormodulen bestückten Dees während des Betriebs zu schützen, da diese sensibel auf Feuchtigkeit und Licht reagieren. Kondensation oder Frost an den Sensormodulen, würden zu einem Kurzschluss führen, der das Modul zerstören würde. Während des Tests der Sensormodule und der dafür erforderlichen Hochvolt-Spannungsversorgung sind die Sensormodule lichtempfindlich. Passiert während des Betriebs ein Teilchen den Sensor, wird ein elektrischer

Tabelle 1.2: Spezifikationen der kritischen Aktoren.

Beschreibung	Spezifikationen
MARTA	Typ: CO_2-Verdampfungskühler Temperatur Kühlmittel: -35°C Anbindung: Hardware Interlock
Trockenluft	Luftdruck: 6 bar bis 8 bar Taupunkt: -70°C bis -80°C
Huber	Model: Unistat 525W Typ: wassergekühlte Kältemaschine Temperaturbereich: -55°C bis 250°C
CAEN Spannungs-versorgung	3 HV-Boards: 3500 V DC 8 LV-Boards: 1 V bis 15 V DC Anbindung: Hardware Interlock

Impuls erzeugt, welcher im Detektor die Nachverfolgung der Teilchenbahn ermöglicht. Werden die Sensoren nun unter Spannung dem Licht der Lampen im Reinraum ausgesetzt, kommt es zu einer Spannungsüberhöhung durch die große Menge an Lichtteilchen, welche die Sensoren treffen, was zu einem sehr hohen Strom und somit einer Beschädigung der der Elektronik an den Sensormodulen führt. Daher wird der Teststand so konzipiert, dass die Dichtungen und Durchführungen lichtundurchlässig sind.

Im Teststand wird die Dee mit befestigten Sensormodulen in der Mitte der Kammer durch einen Aluminium-Rahmen (Arc-Frame) positioniert (Abb. 1.3). Die Dee hängt dadurch frei und wird über die Rückwand mit dem MARTA-Chiller und der CAEN-Spannungsversorgung verbunden. Die Kühlung des Teststandes erfolgt über Kühlrippen, die unter der Decke befestigt sind und mit dem Kühlkreislauf des Hubers verbunden sind. Das Innenvolumen und damit das zu kontrollierende Luftvolumen beträgt 3264 Liter. Mit der knapp 13 cm dicken Isolierung ergeben sich Außenmaße von 3,56 m Breite, 2,06 m Höhe und 0,91 m Tiefe.

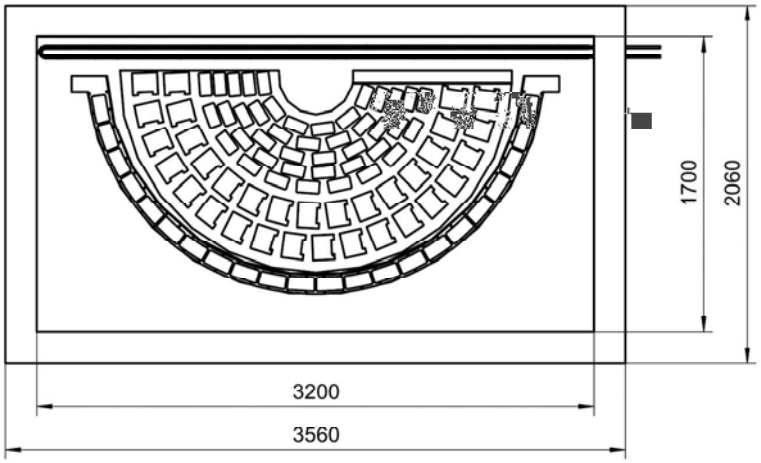

Abbildung 1.3: Der Teststand des Sektortests.

Die Beschädigung der Sensormodule auf eine der beschriebenen Arten, würde schwere Konsequenzen für das CMS Tracker Upgrade mit sich bringen. Eine der Dees, die im Sektortest getestet werden, hat, mit 38 PS-Modulen und 48 2S-Modulen bestückt, einen reinen Materialwert von über einer Million Schweizer Franken. Außerdem wäre es bei Zerstörung aller Sensoren auf einer Dee kaum möglich, diese zu ersetzen, da aufgrund des hohen Preises und der Komplexität der Fertigung pro Sensormodul nur wenig Ersatz produziert werden kann. Daher muss ein Konzept für ein Sicherheitssystem den Schutz der Sensormodule zu jedem Zeitpunkt gewährleisten.

1.3 Lösungsansatz

Um den Schutz der Komponenten vor, während und nach dem Test zu gewährleisten, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Überwachungs- und Steuerungssystem entwickelt, welches automatisiert erfasste Daten auswertet und gegebenenfalls geeignete Maßnahmen ergreift. Vor dem Start des Tests soll durch dieses Sicherheitssystem ein Testzustand hergestellt werden, welcher die Komponenten sowohl vor Feuchtigkeit als auch vor Lichteinfall schützt. Dazu muss die Taupunkttemperatur (T_d) im Inneren gesenkt und der Teststand abgedichtet verschlossen werden. Während der gesamten Zeit, soll der Taupunkt überwacht werden, um möglicher Kondensation und daraus resultierendem Frost frühzeitig vorbeugen zu können oder gegebenenfalls den Test abzubrechen. Die Temperatur wird ebenfalls überwacht sowie der aktuelle Status des Testablaufs. Sensoren messen zu diesem Zwecke die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, den Durchfluss der Zuluft sowie den Taupunkt der Trockenluftversorgung und ob der Teststand ordnungsgemäß verschlossen ist. In der Steuerung soll vor allem die Zufuhr mit Trockenluft und das elektronische Verriegeln des Teststandes gesteuert werden, aber auch die Spannungsversorgung und die Kühlung der Sensormodule sowie die allgemeine Kühlung des Teststandes mit der Kältemaschine. Außerdem soll es während des Sektortests für anwesende Personen ersichtlich sein, in welchem Status sich der Test befindet und ob Änderungen vorgenommen werden können.

Sollte es während des Tests oder in der Vorbereitung auf den Testzustand zu Problemen wie zum Beispiel einem erhöhten Taupunkt kommen und die Komponenten dadurch einer direkten Gefahr ausgesetzt sind, wird das Sicherheitssystem Notfallmaßnahmen ergreifen, welche den Abbruch des Tests und das Herunterfahren des Teststandes in einen stabilen Zustand beinhalten. Dazu wird, um eine möglichst sichere Nutzung zu gewährleisten, sowohl auf Software- als auch auf Hardwareebene mit Interlocks (Verriegelungen) gearbeitet. Liegt ein Interlock an, wird die Ausführung bestimmter Aktionen gesperrt (verriegelt), bis eine Bedingung erfüllt ist, die den Interlock aufhebt. Dadurch kann ein Aktor nur dann einen aktiven Status einnehmen, wenn durch den Betrieb voraussichtlich keine Schäden aufgrund von externen oder internen Umständen entstehen.

1.4 Stand der Technik

Die Taupunktüberwachung im Speziellen hat ein breites Anwendungsfeld im Bereich der Gebäudetechnik, daher sind schon existierende Lösungen auf die Umgebungsbedingungen dort ausgelegt. Dies bedeutet vor allem eine Temperaturspanne im Bereich der Raumtemperatur, was den Nutzen für den Teststand ausschließt. In der industriellen Verwendung von Taupunktüberwachung gibt es hingegen einige Lösungen, die eine Überwachung des Taupunktes bis zu -100°C T_d gewährleisten können [7]. Viele verbinden die Überwachung direkt mit Alarmsystemen, die auf dem geräteeigenen Display angezeigt oder per analogem beziehungsweise digitalem Output ausgelesen werden können [8]. Für die reine Überwachung von Umgebungsbedingungen gibt es dementsprechend einige Komplettlösungen. Allerdings ist eine automatisierte Reaktion auf bestimmte Werte abhängig von dem speziellen Konzept des überwachten Objektes, sodass diese Funktionalität nicht mit angeboten wird. Die Steuerung im Fall des Sektortests muss das Testobjekt und die zum Test verwendeten Geräte wie MARTA und CAEN-Spannungsversorgung beinhalten, um die Sicherheit zu gewährleisten.

An der Universität RTWH Aachen wurde im Zuge einer Masterarbeit ein Konzept entworfen, wie ein Teststand auszusehen hat, der den Test einzelner 2S-Sensormodule für das CMS Tracker Upgrade (Phase II) ermöglicht [9]. Für den sicheren Betrieb sieht das Konzept die Kühlung der Sensormodule mit einer Vorlauftemperatur von -35°C für den MARTA vor und dahingehend auch die Senkung des Taupunktes durch die Zufuhr von Trockenluft. Allerdings wurde hierbei das Verhalten des Teststandes im Vorhinein getestet und die Annahme getroffen, dass aufgrund der Funktionalität eine kontinuierliche Überwachung und automatisierte Reaktionen nicht notwendig sind. Dies ist für den Test eines Sensormoduls ausreichend, da der Test, im Gegensatz zum Sektortest, einerseits einen geringeren Zeitaufwand hat und andererseits der Verlust eines Moduls nicht den Erfolg des Gesamtprojektes gefährden würde. Das zu entwickelnde Sicherheitssystem für den Sektortest muss daher eine kontinuierliche Überwachung des Taupunktes gewährleisten.

Am CERN in Genf wird für den sicheren Betrieb des CMS-Detektors ein Sicherheitssystem verwendet, dass die Auslese von Sensoren zur Überwachung des Taupunktes und die Steuerung von Spannungsversorgungen über eine SPS regelt[10]. Dieses Tracker Safety System (TSS) liest über 1000 Kombisensoren (relative Feuchtigkeit und Temperatur) aus und steuert 1944 Stromversorgungsgruppen. Die Logik wurde aufgrund der hohen

Anzahl an Sensoren und Aktoren in kleinere Gruppen geteilt, die sich an der Position im Detektor orientieren. Da das Abschalten der Stromversorgungen im Detektorbetrieb arbeitsintensive Konsequenzen mit sich bringt, werden die Stromversorgungen nur abschnittsweise abgeschaltet, wenn sich eine vordefinierte Anzahl an Sensoren außerhalb des zulässigen Wertebereichs befindet. Im Sektortest wird eine weitaus geringere Anzahl von Sensoren verwendet und beim Steigen des Taupunktes, über die unterste Grenze an einem einzelnen Sensor, wird die Notfallabschaltung eingeleitet. Die am CERN entwickelten Kombisensoren eignen sich gut für die Anforderungen des Sektortests und werden daher für die Taupunktüberwachung verwendet. Das Konzept zur Gewährleistung der Sicherheit des Sektortests, muss über die Taupunktüberwachung und die Abschaltung des Spannungsversorgung hinaus auch die zugeführte Trockenluft und weitere Sensoren überwachen sowie weitere Steueraufgaben übernehmen. Zu Letzterem zählt beispielsweise die Verriegelung des Teststandes und die Unterbrechung der Sektorkühlung.

1.5 Überblick

In Kapitel 2 werden die Grundlagen erläutert, auf denen das für den Sektortest entwickelte Sicherheitssystem aufbaut. Dies beinhaltet die Herleitung der Formel zur Berechnung der Taupunkttemperatur sowie Abschätzungen, die aufgrund von Simulationen bezüglich der Entwicklung und des Verhaltens des Taupunktes im Teststand getroffen werden. Der Hauptteil dieser Arbeit behandelt die Entwicklung des Sicherheitssystems basierend auf der Analyse der Anforderungen und der zu erwartenden Fehlerszenarien in Kapitel 3. Aus den formulierten Anforderungen und den Lösungsansätzen für die Fehlerszenarien wird die Hardwarearchitektur (Kapitel 4) und Softwarearchitektur (Kapitel 5) abgeleitet. Die Hardwarearchitektur umfasst die Auswahl geeigneter Komponenten für Sensorik und Aktorik sowie ihre Verwendung und Installation am Teststand. In der Softwarearchitektur wird das Programm entwickelt, welches die Sensoren ausliest und die Aktoren steuert, um nach den Vorgaben der Anforderungen und Lösungsansätzen die Testobjekte während des Sektortests zu schützen. Im letzten Abschnitt wird in Kapitel 6 das entwickelte und implementierte Sicherheitssystem auf Harware- und Softwareebene getestet, woraus sich die in Kapitel Kapitel 7 zusammengefassten Erkenntnisse ableiten und ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung gegeben wird.

2 Grundlagen

Für die Entwicklung des Sicherheitssystems ist die genaue Berechnung des Taupunktes wichtig. Dieser wird hergeleitet und vereinfacht, um die Berechnung abhängig von den Messgrößen RH und ϑ zu ermöglichen.
Die Simulation der Taupunktentwicklung im Sektortest dient der Bestimmung eines Erwartungswerts für die notwendige Spülzeit des Teststandes mit Trockenluft, um die notwendige Taupunkttemperatur zu erreichen.

2.1 Berechnung des Taupunktes

Die Berechnung der Taupunkttemperatur T_d erfolgt nach der Ausarbeitung von Mark G. Lawrence im Bulletin of American Meteorological Society von 2005 [11]. Die Gleichung 2.1 ist eine Möglichkeit zur Berechnung von T_d unter Verwendung des Wasserdampfpartialdrucks.

$$T_d = 273,15K + \frac{B \cdot \ln\left(\frac{p_p}{C}\right)}{A - \ln\left(\frac{p_p}{C}\right)} \tag{2.1}$$

T_d : Taupunktemperatur

p_p : Wasserdampfpartialdruck

$A = 17,625 \qquad B = 243,04K \qquad C = 610,94Pa$

Die relative Luftfeuchtigkeit RH (in %) wird definiert als Verhältnis des tatsächlichen Wasserdampfpartialdrucks p_p zum Sättigungsdampfdruck p_{ps} über einer Wasserfläche.

$$RH = 100\frac{p_p}{p_{ps}} \tag{2.2}$$

Nach der Magnus-Formel ist der Sättigungsdampfdruck darstellbar in Abhängigkeit von der Temperatur (ϑ) und zuvor bereits verwendeten Parametern A,B und C.

$$p_{ps} = C \exp(\frac{A \cdot \vartheta}{B \cdot \vartheta}) \tag{2.3}$$

Der Sättigungsdampfdruck p_{ps} ist in gleicher Abhägigkeit von T_d wie der Wasserdampfpartialdrucks p_p von der Temperatur (ϑ): $p_{ps}(T_d) = p_p(\vartheta)$. Wird nun p_{ps} mithilfe der Gleichung 2.3 ersetzt und die daraus entstehende Gleichung 2.1 kombiniert mit der Definition der Luftfeuchtigkeit in Gleichung 2.5 so kann T_d als Gleichung 2.4 aus der relativen Luftfeuchtigkeit RH und der Temperatur ϑ als Messgrößen errechnet werden.

$$T_d = \frac{B \cdot [\ln(\frac{RH}{100}) + \frac{A \cdot \vartheta}{B+\vartheta}]}{A - \ln(\frac{RH}{100}) - \frac{A \cdot \vartheta}{B+\vartheta}} \tag{2.4}$$

Die Parameter A, B und C wurden laut Lawrence nach Alduchov und Eskridge [12] verwendet und sind präzise mit einem relativen Fehler von <0,4% für einen Temperaturbereich von -40°C bis +50°C. Der angestrebte Taupunkt von -45°C liegt außerhalb dieses Bereiches, allerdings ist bei einer Betriebstemperatur von -35°C an den Kühlrohren keine so hohe Präzision unterhalb von -40°C nötig.

2.2 Die Taupunktentwicklung im Sektortest

Der Verlauf des Sektortests kann grob in drei Abschnitte unterteilt werden: die Vorbereitung des Teststandes für die Realbedingungen, den Testprozess und das Herunterfahren. Für die Optimierung der Betriebszeit wird das Verhalten des Taupunktes T_d in Grad Celsius (°C) über die Zeit in Stunden (h) simuliert, abhängig von der Menge des Zuflusses der Trockenluft in Litern pro Minute (l/min). Die Simulationsparameter wurden nach der Annahme ausgelegt, dass eine Zufuhr von trockener Druckluft zu einem Überdruck im Inneren führt, daher die trockenere Luft nach außen dringt und das Eindringen feuchterer Umgebungsluft verhindert. Das zu spülende Innenvolumen (V_{vessel}) beträgt 3264 l. Die Berechnung der Taupunkttemperatur T_d mit der Gleichung 2.4 benötigt die aktuelle relative Luftfeuchtigkeit RH und die aktuelle Temperatur in Grad Celsius ($\vartheta = 20°C$). Die relative Luftfeuchtigkeit wird nach Gleichung 2.5 berechnet.

$$RH = \frac{\rho_h \cdot T \cdot R_w}{p_{ps}} \tag{2.5}$$

ρ_h : Absolute Feuchtigkeit des gespülten Luftvolumens

T : Aktuelle Temperatur in Kelvin

$R_w = 461,52 \frac{J}{kg \cdot K}$: individuelle Gaskonstante des Wassers

p_{ps} : Sättigungsdampfdruck nach Gleichung 2.3

Die absolute Feuchtigkeit ρ_h des gespülten Luftvolumens wird mithilfe der absoluten Feuchtigkeiten der verschiedenen Luftmassen und dem Luftvolumen, dass sich zu dem Zeitpunkt t durch einen stabilen Zufluss an Trockenluft im Teststand befindet (siehe Gleichung 2.6).

$$\rho_h(t) = \frac{\rho_h^{vessel} \cdot V_{vessel} + \rho_h^{dryair} \cdot \frac{dV_{dryair}}{dt} \cdot t}{V_{vessel} + \frac{dV_{dryair}}{dt} \cdot t} \tag{2.6}$$

ρ_h^{vessel} : absolute Feuchtigkeit der Luft vor der Spülung

V_{vessel} : Luftvolumen im Teststand vor der Spülung

ρ_h^{dryair} : absolute Feuchtigkeit der spülenden Trockenluft

$\frac{dV_{dryair}}{dt}$: Zuflussrate der Trockenluft pro Zeit

In Abbildung 2.1 wird deutlich, das bei einer Durchflussrate von 200 l/min der Teststand des Sektortests über 30 Stunden braucht, um den erforderlichen Taupunkt von maximal -45°C zu erreichen. Die Vorbereitung des Teststand muss daher auf eine Zeit gelegt werden, in der durch das Warten keine Arbeitszeit verloren geht. Dadurch ist es vonnöten, dass die Vorbereitung und die Überwachung dieses Prozesses durch das Sicherheitssystem vollkommen automatisiert ist.

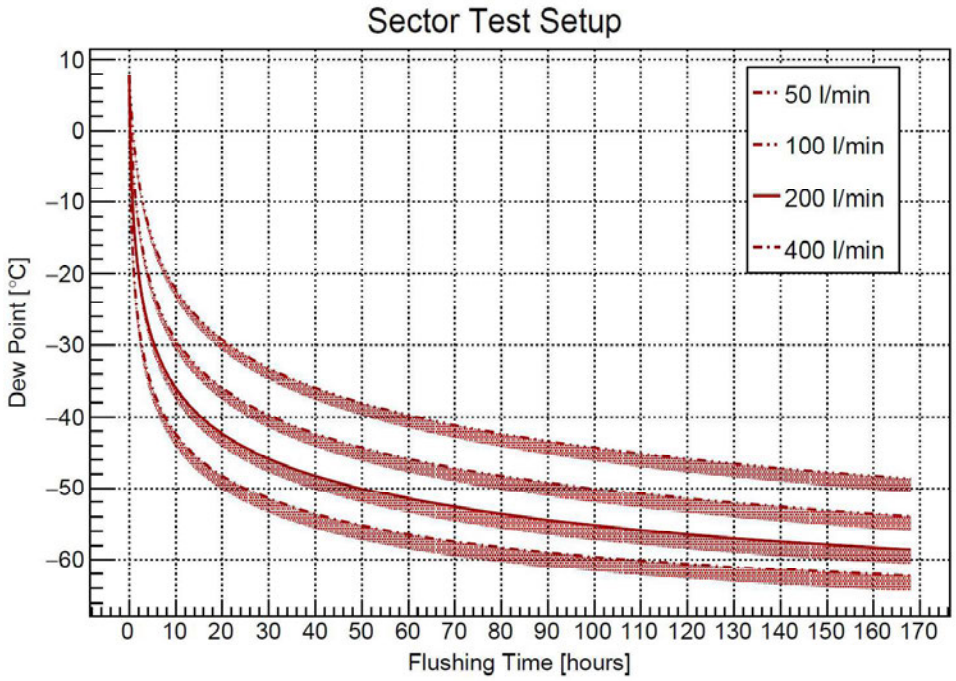

Abbildung 2.1: Taupunkt des Teststandes über die Zeit mit verschiedenen Durchflussraten.

3 Anforderungsanalyse

Die Analyse der Anforderungen geht unter Abschnitt 3.1 auf die Rahmenbedingungen ein und priorisiert diese nach der Notwendigkeit der Implementierung. Bei der Erläuterung der Anforderungen wird darauf eingegangen wie die Erfüllung umgesetzt wird. Zusätzlich werden in Abschnitt 3.2 Fehlerszenarien erstellt, um das Konzept des Sicherheitssystems auf mögliche Probleme vorzubereiten. Die Fehlerszenarien werden mit einem ersten Lösungsansatz versehen.

3.1 Generelle Anforderungen

Wenn der Teststand geschlossen ist und der Testprozess gestartet wurde, soll die Kammmer mit Trockenluft gespült werden, um so den Taupunkt zu senken. Die Spannungsversorgung der Sensormodule soll nach dem Schließen des Teststandes bereits nutzbar sein. Ist der Taupunkt gesunken, wird die Temperatur der Umgebungsluft im Teststand mithilfe des Hubers gesenkt. Ist der Taupunkt auf -45°C gesenkt und der Teststand auf -20°C gekühlt, soll die Kühlung eines Sektors durch der MARTA möglich sein. Während des Sektortests muss ein Interlocksystem verhindern, dass die Tür geöffnet wird, um ein Eindringen der feuchten Umgebungsluft zu verhindern. Dies wird per elektronischer Verriegelung realisiert. Außerdem wird im Ernstfall der MARTA deaktiviert sowie das Gesamtsetup in einen Ausgangszustand versetzt.

Das Auslesen von Sensoren und die Steuerung von Aktoren soll in einem Programm zusammengefasst werden, welches unabhängig von äußeren Umständen wie einer funktionierenden Internetverbindung, eines stabilen Stromnetzes oder Computers arbeitet. Die Stromausfälle am DESY waren im letzten Jahr nur von kurzer Dauer, müssen allerdings trotzdem berücksichtigt werden. Dies wird im Vorhinein an einem kleinen Prototyp

des Setups erprobt. Die Anforderungen an das Konzept des Sicherheitssytems des Teststandes, das sowohl das Überwachen als auch die Steuerung übernimmt, sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Prioritäten der Anforderungen.

Nr.	Name	Unterpunkte	Priorität
1	Taupunktkontrolle	1.1 Überwachen 1.2 Reagieren	Hoch
2	Realbedingungen	2.1 Temperaturmessung 2.2 Trockenluftzufuhr 2.3 Kühlen	Hoch
3	Mechanische Sicherheit	3.1 Überwachen 3.2 Verriegeln 3.3 Signalgeber	Sehr Hoch
4	Kontrolliertes Herunterfahren	4.1 Beenden des Tests 4.2 Stabilen Zustand herstellen 4.3 Rückmeldung Nutzer*in	Hoch
5	Notfallabschaltung	5.1 Abbruch des Tests 5.2 Abgesicherter Modus 5.3 Rückmeldung an Nutzer*in	Sehr Hoch
6	Dokumentation	Testskript	Mittel

Anforderung 1 - Taupunktkontrolle: Der Taupunkt innerhalb des Teststandes soll gemessen und die Daten für die weitere Nutzung aufbereitet werden (1.1). Der Taupunkt der Luft außerhalb des Teststandes soll als Referenz ebenfalls gemessen werden. Ist im Betriebszustand eine Kühlung aktiv und besteht durch ein Ansteigen des Taupunktes die Gefahr der Kondensation, soll auf entsprechende Werte reagiert werden (1.2).

Anforderung 2 - Realbedingungen: Der Teststand wird in einem Zustand betrieben, der den Realbedingungen im Detektor bezüglich relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur entspricht. Dieser muss hergestellt und kontrolliert werden. Dazu soll die Temperatur innerhalb des Teststandes überwacht und für die Weiterverwendung aufbereitet werden (2.1). Für die Qualitäts-Kontrolle der Luft ist es notwendig, dass der Taupunkt der Zuluft gemessen wird und die Zufuhr gegebenfalls geöffnet oder geschlossen werden kann. Außerdem soll die Durchflussmenge bestimmt werden (2.2). Die Temperatur der

Luft im Teststand wird darüber hinaus mithilfe eines Kühlaggregats gesenkt und auf das Erreichen der korrekten Realbedingungen wird mit dem Eintritt in den Testzustand reagiert (2.3).

Anforderung 3 - Mechanische Sicherheit Während der Laufzeit der Tests muss der Teststand gegen mechanische Einwirkungen und andere Störungen von außen, speziell durch die Nutzer*innen, abgesichert sein. Dazu muss überwacht werden, ob der Teststand richtig geschlossen ist oder manuell geöffnet wurde (3.1). Während des Betriebs ist der Teststand zu verriegeln, um eine ungeplante Öffnung zu verhindern (3.2). Für die Nutzer*innen soll ein visueller Indikator vorhanden sein, der den Status im Inneren spiegelt und anzeigt, ob der Teststand geöffnet werden kann oder ob ein Fehler vorliegt (3.3).

Anforderung 4 - Kontrolliertes Herunterfahren Der Teststand wird aus dem Testzustand kontrolliert in einen stabilen Zustand gebracht, in dem die Tür geöffnet werden kann und Änderungen am Aufbau vorgenommen werden können. Dieser stabile Zustand orientiert sich am Taupunkt im umgebenden Reinraum, sind die Temperaturen im Inneren höher als der Taupunkt außerhalb ist der Zustand bezüglich Kondensation stabil, da es nicht zu Kondensation an den Testobjekten kommen kann. Entscheidet der*die Nutzer*in, dass der laufende Test beendet werden kann, soll die Spannungsversorgung und Kühlung der Sensormodule abgeschaltet werden (4.1). Um den Teststand nach dem Beenden des Tests wieder öffnen zu können, müssen die Kühlung des Teststandes heruntergefahren werden und die elektronischen Riegel bei dem Erreichen des stabilen Zustands geöffnet werden (4.2). Der gesamte Prozess muss durch den*die Nutzer*in nachverfolgbar sein und sobald der Teststand geöffnet werden kann, soll dies für den*die Nutzer*in erkennbar sein (4.3).

Anforderung 5 - Notfall Liegt ein Problem vor, durch das die Testobjekte gefährdet sein könnten, wird ein Prozess eingeleitet, der zu einem raschen Herstellen eines stabilen Zustands führt. Hierbei sind Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der zu ergreifenden Maßnahmen wichtig. Für den Abbruch des Tests werden die Spannungsversorgung und die Kühlung der Sensormodule durch einen Interlock unterbrochen (5.1). Im abgesicherten Modus wird der Teststand so schnell wie möglich in einen Zustand gebracht, in dem eine Öffnung möglich ist (5.2). Als Rückmeldung wird der*dem Nutzer*in signalisiert, dass sich der Teststand im Notfall-Modus befindet (5.3).

Anforderung 6 - Dokumentation Damit nach einer Änderung an der Software die Erfüllung der ursprünglichen Anforderungen getestet werden kann, soll ein Softwaretest erstellt werden (6.1).

3.2 Fehlerszenarien

Die nach aktuellem Stand zu erwartenden Fehlerszenarien, ohne entsprechende Anpassung des Sicherheitskonzepts um diesen zu begegnen, werden in Tabelle 3.2 gelistet und bezüglich potenzieller Schadenshöhe und Eintrittshäufigkeit klassifiziert. Aus diesen beiden Parametern wird dann eine Risikobewertung nach der Risikomatrix des Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) im BSI-Standard 200-3 von 2017 abgeleitet [13]. Da die Fehlerszenarien vor allem den Ausfall oder den Auftritt eines Fehlers bei den Aktoren betreffen, wird die Reaktion auf die Szenarien softwareseitig implementiert. Auf der Hardwareseite werden bei der Auswahl Kriterien verwendet, die vorbeugend wirken.

Tabelle 3.2: Risikobewertung der Fehlerszenarien ohne Anpassung des Sicherheitskonzepts.

Nr.	Fehlerfall	Schadenshöhe	Eintrittshäufigkeit	Bewertung
1	Stromausfall	beträchtlich	selten	mittel
2	Fehler/Ausfall Kompressor Trockenluft	existenzbedrohend	selten	mittel
3	Eindringende Feuchtigkeit	beträchtlich	häufig	hoch
4	Öffnung im Testzustand	existenzbedrohend	mittel	hoch
5	Fehler/Ausfall Huber	begrenzt	selten	gering
6	Sensor Ausfall	vernachlässigbar	selten	gering
7	Fehlerhafte Auslese der Sensoren	beträchtlich	selten	mittel
8	SPS Ausfall	existenzbedrohend	selten	mittel
9	MARTA Ausfall	existenzbedrohend	mittel	hoch

Fehlerfall 1 - Stromausfall Das DESY wird vom Energieversorger Vattenfall durch eine duale Einspeisung versorgt, dadurch ist ein standortweiter Stromausfall sehr unwahrscheinlich. Auch der Ausfall von Transformatoren auf dem Betriebsgländе liegt einige Jahre zurück. An einzelnen Gebäuden kommt es punktuell zu Stromausfällen, welche allerdings schon nach wenigen Minuten behoben werden. Dies ist bei dem betreffenden Gebäude im Jahre 2021 zweimal passiert. Sollte es dennoch zu einem Stromausfall am Teststand kommen, ist zu erwarten, dass die Trägheit der Luftmenge im Inneren ein Steigen des Taupunktes und die damit verbundene Kondensation verlangsamt. Durch den Stromausfall würde auch die Kühlung der Module unterbrochen werden und die Kühlrohre werden sich vorraussichtlich im gleichen Maße aufwärmen wie die Umgebung. Dadurch ist eine Kondensation an den Bauteilen unwahrscheinlich.

> **Lösungsansatz:** Die SPS wird so programmiert, dass sie bei Anliegen der Stromversorgung sofort startet und automatisch in einen stabilen Zustand versetzt wird.

Fehlerfall 2 - Fehler/Ausfall Kompressor Trockenluft: Die Trockenluft am Teststand hat einen Taupunkt von -70°C T_d, was für den Normalbetrieb optimal ist. Sollte der Taupunkt durch einen Fehler am Trockner deutlich darüber liegen, kann dies zu Kondensation im Inneren des Teststandes führen und damit zur Beschädigung der Module. Ein Ausfall der Trockenluft würde durch eine gute Abdichtung des Teststandes zu keinen großen Problemen führen, da der Taupunkt im Teststand nur langsam steigen würde und die Funktionalität des Kompressors durch die Belegschaft des DESY regelmäßig überprüft wird.

> **Lösungsansatz:** Die Trockenluft wird vor der Einspeisung in den Teststand mit einem Taupunktsensor und einem Durchflussmesser versehen. Weichen die gemessenen Werte von den Vorgaben ab, wird durch ein elektronisches Ventil die Zuluft geschlossen.

Fehlerfall 3 - Dichtungen im Teststand durchlässig: Alle Öffnungen des Teststandes werden mit Dichtband versehen, um stabile Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Dabei kann es durch Verzug der Gerüstteile sowie durch fehlerhaftes oder falsch eingebautes Dichtmaterial dazu kommen, dass ein Luftaustausch mit der Umgebungsluft

stattfindet. Dadurch könnte Luft mit einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit eindringen, was das Senken des Taupunktes erschwert und bei Auftreten nach Betriebsbeginn im schlimmsten Fall zu Kondensation führen kann. In einem ähnlichen Testaufbau wurde der Teststand vor jedem Durchlauf mit Klebeband versiegelt.

> **Lösungsansatz:** Die Trockenluft für den Teststand wird im Kompressor als Druckluft mit 8 bar erzeugt. Im Inneren entsteht deshalb ein leichter Überdruck, knapp über Normaldruck, wodurch die Umgebungsluft durch kleine Öffnungen nicht eindringen kann, es wird eher Luft nach außen abgegeben.

Fehlerfall 4 - Öffnung im Testzustand: Der Teststand befindet sich in einem gemeinschaftlich genutzen Reinraum und wird von verschiedenen Personen aus der Abteilung genutzt. Dadurch ist es nicht selbstverständlich, dass die Person, die gerade an dem Teststand arbeitet, in alle Feinheiten des sicheren Betriebs eingewiesen ist. Das kann dazu führen, dass eine Person den Teststand während eines laufenden Tests öffnet. Die dabei schlagartig eindringende Luftmasse würde aufgrund ihres großen Volumens augenblicklich zu einem starken Anstieg des Taupunktes und einer direkten Kondensation und damit Beschädigung führen.

> **Lösungsansatz:** Auf der Oberseite des Teststandes wird eine dreifarbige Signalsäule angebracht, deren aktueller Leuchtzustand den Zustand im Inneren widerspiegelt. Außerdem wird an der Signalsäule ein Informationsschild mit der Erläuterung der Zustände und Handlungsempfehlungen angebracht. Zusätzlich werden elektronische Schlösser installiert, die schon beim Hochfahren des Teststandes diesen verschließen. Die Schlösser werden mit Sensoren kombiniert, die dem Kontrollprogramm Rückmeldung darüber geben, ob alles ordnungsgemäß verschlossen ist.

Fehlerfall 5 - Fehler/Ausfall Huber: Bei der Durchführung eines Tests werden zwei separate Kühlaggregate genutzt, eins für die Kühlung der Module auf der Dee (MARTA) und eins zur Kühlung des gesamten Teststandes (Huber), durch Kühlrippen an der Decke des Teststandes. Dies ist notwendig, um möglichst realistisch die Bedingungen im Detektor zu simulieren. Führt ein Fehler oder ein Ausfall zu einer höheren Temperatur an den Kühlrippen wird dies nicht direkt zu Kondensation führen, da der höchste zulässige Taupunkt im Teststand für die Kühlung der Module durch den MARTA dimensioniert wird, was eine niedrigere Temperatur benötigt. Allerdings führt eine höhere Temperatur

im Teststand zu einem höheren Taupunkt, wodurch wiederum die Wahrscheinlichkeit von Kondensation steigt. Ein Steigen der Temperatur führt bei konstanter, absoluter Luftfeuchtigkeit zu einem geringen Ansteigen des Taupunktes.

> **Lösungsansatz:** Befindet sich der Sektortest im Testbetrieb und die Temperatur im Inneren steigt über -10°C wird das kontrollierte Herunterfahren gestartet.

Fehlerfall 6 - Sensor Ausfall: Im und am Teststand werden analoge Sensoren zur Überwachung eingesetzt. Sollte es zum Ausfall eines Sensors kommen, kann das Sicherheitssystem nicht mehr auf alle notwendigen Informationen zugreifen und trifft auf dieser verfälschten Datenlage eventuell eine Entscheidung, die weitere Probleme mit sich bringt.

> **Lösungsansatz:** Von den Sensoren werden mehrere im Teststand sowie einige außerhalb als Referenz angebracht, wodurch das Ausfallen eines Sensors im Inneren keine Auswirkungen auf den Betrieb haben sollte. Fällt der Referenzsensor weg, ist ein Weiterbetrieb trotzdem möglich, da die Umgebungsbedingungen des Teststandes im Reinraum durch eine separate Überwachung stabil gehalten werden. Der Ausfall des Taupunktsensors in der Zuluft würde einen sicheren Betrieb des Teststandes gefährden, daher muss der Testzustand im Zweifelsfall verlassen werden. Um dem vorzubeugen, sollte bei der Beschaffung des Taupunktsensors auf eine entsprechende Qualität geachtet werden. Es werden mehrere Sensoren verwendet, die den Schließstatus des Teststandes überprüfen.

Fehlerfall 7 - Fehlerhafte Auslese der Sensoren: Senden die Sensoren ein verfälschtes Signal, kann dies dazu führen, dass auf dieser Basis falsche Entscheidungen getroffen werden, die die Beschädigung der Testobjekte zu Folge haben könnte, vor allem dann, wenn ein falscher Taupunkt errechnet wird.

> **Lösungsansatz:** Geringe Abweichungen sind bei Sensoren immer zu erwarten, deshalb ist es sinnvoll, den endgültigen Wert aus den verschiedenen Sensoren zu mitteln und Ausreißer rauszurechnen. Dadurch ist das Sicherheitskonzept weniger fehleranfällig. Des Weiteren wird bei der Programmierung darauf geachtet, das die eingehenden Werte anhand von vorher festgelegten Kriterien überprüft werden und damit ein Fehlerrahmen bestimmt wird, in dem sich die

Abweichungen maximal befinden dürfen, um nicht ein Herunterfahren des Teststandes auszulösen.

Fehlerfall 8 - SPS Ausfall: An der Funktionalität der SPS hängt in direkter Weise die Funktionalität des Sicherheitskonzeptes. Fällt die SPS aus, lässt sich weder nachvollziehen, welche Bedingung im Inneren gegeben sind, noch automatisiert geeignete Notfallmaßnahmen ergreifen.

Lösungsansatz: Um eine komplette Abhängigkeit von der SPS zu vermeiden, sind alle relevanten Systeme mit manuellen Manipulationsmöglichkeiten versehen. So können die Schlösser mit einem Schraubendreher entriegelt sowie die Kühlaggregate über eigene Bedienfelder heruntergefahren werden.

Fehlerfall 9 - MARTA Ausfall: Fällt der MARTA aus, werden die Sensormodule nicht mehr gekühlt. Sind diese längere Zeit in Betrieb und die Hochvoltversorgung ist aktiv, kann dies zur Überhitzung der Sensormodule führen.

Lösungsansatz: Ein Temperatursensor an den Kühlrohren des MARTA überwacht die aktuelle Temperatur. Wenn im Testbetrieb, bei angeschalteter Hochvoltversorgung, die Temperatur über -30°C steigt, nachdem die -35°C einmal erreicht wurden, wird die Notfallabschaltung eingeleitet.

4 Hardwarearchitektur

Die Hardwarearchitektur umfasst alle verwendeten Komponenten, wie Sensoren, Aktoren und die Steuerungsmodule. Die Auswahl der notwendigen Komponenten sowie die Spezifikationen und damit verbundene Modell- und Herstellerauswahl richten sich nach den Anforderungen, die in Kapitel 2 analysiert wurden. Des Weiteren ist die Platzierung der Komponenten im und am Teststand für die Funktionalität entscheidend, daher wird die Implementierung anhand einer technischen Zeichnung betrachtet.

4.1 Komponenten

Für die Überwachung und Steuerung des Teststandes sind Sensoren und Aktoren notwendig. Während die Sensorik die Aufnahme und Übermittlung von Messgrößen ermöglicht, ist die Aktorik für die Bedienung der sicherheitsrelevanten Geräte zuständig. Die Logik zur Verknüpfung dieser beiden Teilbereiche per Interlocks in einem Sicherheitssystem kann über eine SPS oder programmierbare Logik-Gatter wie Field Programmable Gate Array (FPGA) realisiert werden, aber auch je nach Anwendungsgebiet fest verdrahtet über Relais oder Logikkarten. Der Änderungsaufwand der Letzteren ist durch die Realiserung der Logik per Festverdrahtung hoch und daher für das zu entwickelnde System nicht geeignet, da der Teststand und die dazugehörige Hardware und Software nach den Sektortesten weiter verwendet werden sollen, für Tests anderer Art. Der große Vorteil der FPGA gegenüber der SPS ist die Geschwindigkeit. Die Reaktionszeit kann im Nanosekundenbereich liegen, allerdings sind SPS im Gegensatz zu FPGA besser auf sicherheitsrelevante Anwendungen ausgelegt. Außerdem sind bei der Überwachung und Steuerung eines Systems nach trägen physikalischen Parametern die Reaktions- und Zyklenzeiten der SPS im Bereich weniger Millisekunden mehr als ausreichend [14]. Für das Sicherheitssystem des Sektortest wird daher eine SPS mit analogen Inputmodulen und digitalen Outputmodulen verwendet.

4.1.1 Steuergerät

Die verwendete SPS ist eine SIMATIC S7-300 von Siemens mit Spannungsversorgungsmodulen von TRACO POWER für 24 V DC und 5 V DC, sowie einem SITOP PSE200U Selektivitätsmodul von Siemens für die Verteilung der 24 V DC Versorgungen der Sensoren. Für die Auslese der Sensoren werden drei analoge Inputmodule verwendet, die Steuerung der Aktoren wird von zwei digitalen Outputmodulen übernommen und der Programmablauf läuft auf einer Siemens Central Processing Unit (CPU) mit einem Communication Processor (CP) für die Ethernetanbindung.

CPU Als CPU kommt die CPU 315-2 DP zum Einsatz mit der Firmware Version 3.3, durch eine CP 343-1 IT kann die CPU über ein Ethernet-Kabel mit einem PC oder dem DESY Netzwerk verbunden werden. An der SPS kann über einen Schalter das Programm gestartet ("RUN") und gestoppt (SSTOP") werden, was das Herunterladen eines neuen Programms ermöglicht. Die Programmierung der CPU bei der S7-300 wird mit der Siemens eigenen Software STEP 7 realisiert. Diese ist auf zyklische Abarbeitung ausgelegt und nutzt sogenannte Blöcke. Der Organisations-Block (OB) strukturiert das Programm der Nutzer*innen, der OB1 wird als erstes aufgerufen und wird als einziger bei jedem Zyklus einmal komplett sukzessiv ausgeführt. Für die Speicherung von prozessrelevanten Daten werden Daten-Blöcke (DB) verwendet, die Verarbeitung der Daten und die eigentliche Logik des Programmes wird in Funktions-Blöcke (FC) ausgelagert, die entweder aus dem OB1 oder anderen Funktions-Blöcken aufgerufen werden [15].

Analoge Input Module Für die Auslese der analogen Temperatursensoren werden zwei Temperatur Input (TI) Analogeingaben verwendet, die über eine 2, 3 oder 4-Draht Widerstandsmessung vor allem Resistance Temperature Detector (RTD)-Sensoren auslesen können. Jedes TI-Modul hat 8 Eingänge für Widerstandsmessungen. Das dritte Modul für Analogeingaben ist ein 12-Bit Modul, welches sowohl Widerstandsmessungen, als auch Spannungs- und Strommessungen durchführen kann. Dabei kann der Eingang auf einen gewünschten Messtyp und dazugehörigen Messbereich parametriert werden. Für die Spannungsmessung kann das Spannungsniveau von ±80 mV bis ± 10 V eingestellt werden. Ein Eingangsstrom wird über eine 2 oder 4-Draht Messung ausgelesen, mit Stromniveaus von ±3.2 mA bis ± 20 mA. Dies hängt von dem angeschlossenen Sensor und gegebenenfalls der gewünschten Genauigkeit ab.

Digitale Output Module Um die Aktoren durch SPS-Signale steuern zu können, werden zwei digitale Ausgabemodule verwendet. Ein Relais Outputmodul mit 8 Schaltausgängen (24 V Schaltspannung) und ein 24 V Outputmodul mit 32 Ausgängen, die 24 V DC binär auf aktiv (24 V) oder inaktiv (0 V) schalten können.

4.1.2 Sensorik

Die Sensorik umfasst alle verwendeten analogen Sensoren, die für die relevanten Messungen eingesetzt werden. Die Auswahl der Sensoren orientiert sich an den Anforderungen, die in Kapitel 2 gestellt werden. Bezüglich der Anforderung 1 (Taupunktkontrolle) werden zur Überwachung zwei verschiedene Typen von Sensoren eingesetzt. Der erste ist ein Kombisensor, bei dem ein Sensor für Temperatur und einer für relative Feuchtigkeit auf einem Printed Circuit Board (PCB) montiert und ausgelesen werden. Softwareseitig wird dann aus diesen beiden Werten nach der Formel 2.1 eine Taupunkttemperatur errechnet. Der zweite ist ein Taupunktsensor, der als Messwert direkt eine Taupunkttemperatur ausgibt und im Bereich der Trockenluftzufuhr eingesetzt wird. Für die Überwachung der mechanischen Sicherheit (Anforderung 3.1) sind Türsensoren installiert, die den Schließzustand der Tür an die SPS melden können.

PCB-Kombisensoren: HIH400, PT1000 Für die Taupunktüberwachung im Teststand werden am CERN entwickelte Kombisensoren eingesetzt. Diese bestehen aus einem PT1000 Temperatursensor und einem Honeywell HIH4000 Feuchtigkeitssensor welche über ein PCB ausgelesen und mit Spannung versorgt werden. Jeder der zwei Sensoren auf dem Board wird über 4 Kabel vom PCB aus an die SPS angeschlossen. Der PT1000 hat bei einer Temperatur von 0°C einen Nennwiderstand von 1000 Ω. Per 4-Draht Widerstandsmessung wird der PT1000 an ein TI Modul angeschlossen, welches einen bereits vorverarbeiteten Wert an die CPU weitergibt, der gemessene Wert entspricht 1/100°C.
Für den, an das 12-Bit Modul angeschlossenen, HIH4000 ist eine Spannungsversorgung (V_{SUPPLY}) notwendig, die mithilfe des PCB stabil bei 5 Vdc gehalten wird und so eine möglichst genaue Messung mit einem Fehler von ±3.5% RH ermöglicht. Die Ausgangsspannung (V_{OUT}) des Sensors liegt im Bereich von 0.8 V bis 3.8 V und wird über die Gleichung 4.1 aus dem Datenblatt in einen relativen Feuchtigkeitswert umgerechnet [16].

$$RH = \frac{\frac{V_{OUT}}{V_{SUPPLY}} - 0.16}{0.0062}[in\%] \tag{4.1}$$

Taupunktsensor: Vaisala DMT143 Die Trockenluft, mit der der Teststand gespült wird, hat eine Temperatur von circa 20°C und eine Taupunkttemperatur unter -70°C T_d. Das entspricht nach der vereinfachten Formel von Lawrence (Gleichung 2.4) einer relativen Luftfeuchtigkeit von 0,021%, ein Wertebereich, den der Kombisensor mit dem HIH4000 nicht mehr zuverlässig erfassen kann. Daher ist für die Überwachung der Qualität der Trockenluft ein anderer Sensor notwendig. Der DMT143 von Vaisala ist für niedrige Taupunkte optimiert, der analoge Ausgang wird auf einen Bereich zwischen -80°C und 20°C T_d skaliert. Unterhalb von 0°C liegt der Fehler bei ± 3°C T_d [17]. Der Vaisala-Sensor wird an das 12-Bit Input Modul angeschlossen mit einem Messbereich von 4 mA bis 20 mA. Mehr als ein Sensor dieser Art von Vaisala wird aufgrund des hohen Stückpreises nicht verwendet.

Türsensor: Bernstein SRF An der Tür werden zwei Sensoren angebracht, die mit 24 V DC Betriebsspannung den Schließzustand an die SPS melden können. Um sensorseitige Verwechslungen mit anderen Bauteilen auszuschließen, werden SRF (Safety Radio-Frequency Identification (RFID)) Sensoren von Bernstein verwendet. Über einen PNP-Diagnose Ausgang werden die 10 mA Ausgangsstrom über das 12-Bit Inputmodul ausgewertet [18].

4.1.3 Aktorik

Die Aktoren sollen die, per Sensoren ermittelten Werte und die daraus resultierenden Maßnahmen, orientiert an den Anforderungen aus Kapitel 2, umsetzen. Bezüglich der Anforderung 3.2 (mechanische Sicherheit) werden hierzu Sicherheitsschalter verwendet, die den Teststand verriegeln können. Damit der*die Nutzer*in immer über den Zustand des Teststandes Bescheid weiß, besonders wegen der Anforderungen 4.3 und 5.3 (Herunterfahren/Notfallabschaltung), wird eine Signalsäule sichtbar angebracht. Damit die Anforderung 2.2 (Trockenluftzufuhr) mit der Anforderung 1 (Taupunktkontrolle) kompatibel ist, wird ein Magnetventil vor der Zufuhr der Trockenluft in den Teststand installiert, um die Trockenluftzufuhr unterbrechen zu können. Die Komponenten MARTA, CAEN und Huber sind im Sektortest vorgesehen und benötigen die Steuerung durch das Sicherheitssystem, wenn ein Problem auftritt. Dies entspricht den Anforderungen 4.1 und 4.2 sowie 5.1 und 5.2.

Signalsäule: WERMA Während des Betriebes soll der Status des Teststandes jederzeit auf einen Blick von außen einsehbar sein, um gegebenenfalls geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, wie das Öffnen des Teststandes zum Tausch des Testobjekts. Dazu wird eine Signalsäule von WERMA an der Oberseite des Teststandes angebracht. Die drei Leuchten im Inneren werden einzeln an das 24 V Outputmodul angeschlossen, dadurch kann die gewünschte Farbe durch Schalten des jeweiligen Ausgangs aktiviert werden [19].

Sicherheitsschalter: Bernstein SLC Eine der wichtigsten Anforderungen an das Sicherheitssystem ist das Gewährleisten eines abgeschlossenen Zustands zum Schutz der Testobjekte. Mit den SLC Sicherheitsschaltern von Bernstein kann die Tür des Teststandes elektronisch verriegelt werden [20]. Wird von dem 24 V Outputmodul die Spannung an einen Sicherheitsschalter angelegt, ist es möglich, diesen zu öffnen. Bei einem Wegfall der Spannung befindet sich der Sicherheitsschalter im geschlossenen Zustand, dies gilt dementsprechend auch für einen Stromausfall.

Magnetventil: FESTO VZWF Damit der Taupunkt im Teststand gesenkt werden kann, muss der Teststand mit Trockenluft geflutet werden. Ist die Zuluft kompromittiert und liegt bezüglich des Taupunktes außerhalb eines Toleranzrahmens und damit über -60°C T_d, muss die Versorgung mit Zuluft unterbunden werden. Das elektronische Membranventil VZWF von FESTO ist bei 24 V DC anliegender Spannung von dem 24 V Outputmodul magnetisch geöffnet und wird bei Wegfall der Spannung automatisch geschlossen [21].

Sektor Kühlaggregat: MARTA Die Kühlung der Sektoren der Dee, die im Rahmen des Sektortests überprüft werden soll, wird mit dem CO_2-Chiller realisiert. Der MARTA ist ein Verdampfungskühler, der eine Minimaltemperatur von -35°C innerhalb der Kühlleitungen im Testobjekt erreichen kann. Der kälteste Punkt der Kühlleitungen ist kurz vor der Rückführung in den MARTA. Die Kühlleistung des MARTA ist durch den Primärkühler begrenzt. Für den sicheren Betrieb verfügt der MARTA über einen Hardware-Interlock-Stecker. Liegen dort die 24 V DC des 24-V-Outputmoduls an, wird das InterlockIN-Signal aktiv und die Kühlmittelpumpe wird abgeschaltet. Das restliche CO_2 in den Kühlleitungen verdampft und die Kühlleitungen erwärmen sich mit der Umgebung zusammen. Da dabei allerdings auch kein CO_2 abgepumpt werden kann und mit

einer höheren Belastung der Kühlrohre durch das Verdampfen während des Aufwärmens einhergeht, sollte dieser Interlock nur im äußersten Notfall aktiviert werden. Liegt keine Spannung an dem Interlock-Stecker an, kann der MARTA regulär genutzt werden.

Sensormodul Spannungsversorgung: CAEN Die Sensormodule der Pixel- und Streifensensoren auf der Dee werden, um getestet zu werden, mit einer Niedrigvoltspannung (LV) und einer Hochvoltspannung (HV) durch CAEN Power Supply Boards versorgt, welche über eine Möglichkeit zum Anschließen eines Hardware-Interlock-Steckers verfügen. Dieser ist an die SPS über das Relais-Outputmodul angebunden. Dadurch werden, wenn der entsprechende Relais-Ausgang eines Boards aktiv ist, zwei Pins des jeweiligen Steckers kurzgeschlossen, was das Board durch ein ENABLE-Signal nutzbar schaltet. Ist der Ausgang des Relais deaktiviert, wird zwischen den Pins ein Kontakt geöffnet, wodurch ein INTERLOCK-Signal gesendet wird, dass das sofortige Abschalten der Boards zur Folge hat. Diese Logik gilt für die LV- und die HV-Boards.Die LV-Boards von CAEN haben eine Leistung von 50 W und einen Spannungsbereich von 1 V bis 15 V mit einer Abschaltzeit von unter 1 ms, wenn das Interlock-Signal aktiv ist. Bei den HV-Boards von CAEN können 24 Kanäle mit einer Spannung zwischen 0 V und 3.5 kV und einer Leistung von 9 W versorgt werden. Die kürzeste Abschaltzeit im Falle eines Interlocks beträgt 7 s, da die maximale Ramp-Down Rate (Abschaltrate) bei 500 V/s liegt. Bei der An- oder Abschaltung der CAEN-Module ist eine Reihenfolge zu beachten. Die HV-Boards dürfen erst dann angeschaltet werden, wenn die LV-Boards bereits laufen. Beim Abschalten gilt das umgekehrt, die HV-Boards werden zuerst deaktiviert und erst wenn diese abgeschaltet sind, dürfen die LV-Boards den Abschaltprozess beginnen. Liegt die Versorgung der HV-Boards an den Sensormodulen an, sind diese aufgrund des hohen Spannungsniveaus besonders stark der Gefahr der Spannungsüberhöhung ausgesetzt. Bei alleinigem Anliegen der Spannung der LV-Boards ist das Risiko gering.

Teststand Kühlaggregat: Huber Um die Umgebungsbedingungen während des Tests möglichst realistisch zu halten, wird der gesamte Teststand mithilfe des Hubers, einer Kältemaschine der Huber AG gekühlt. Das verwendete Modell Unistat 525w, ist ein Kälte-Wärme Umwälzthermostat mit wassergekühlter Kältemaschine. Der Temperaturbereich liegt zwischen -55°C und 250°C bei einer Kälteleistung von bis zu 10kW und einer maximalen Förderleistung von 79 l/min. Da es keinen Hardware-Anschluss für Interlock Signale gibt, kann der Huber nicht von der SPS aus mit den digitalen Outputmodulen gesteuert werden.

4.1.4 Netzstruktur

Das Steuergerät, die SPS, wird mithilfe des Simatic Managers von Siemens über einen PC programmiert. Ist das Programm kompiliert und auf die CPU des Steuergeräts heruntergeladen, kann diese das Programm autonom ausführen. Die Verbindung zwischen der SPS und dem PC läuft über den CP. Die Netzstruktur (siehe Abbildung 4.1) aller verwendeten Komponenten ist in drei Teilbereiche aufgeteilt, die Operations- und Überwachungsebene stellt dabei die Oberste dar. Die zweite Ebene, die Kontrollebene, beeinhaltet die SPS, während sich die Sensoren und Aktoren in der dritten und untersten Ebene befinden. An das analoge Inputmodul für die TI (AI RTD) werden alle Temperatursensoren (t Sensor) angeschlossen. Das analoge 12-Bit Inputmodul (AI 12Bit) liest die Signale des Taupunktsensors (DP Sensor), der Feuchtigkeitssensoren (RH Sensor), des Durchflussmessers (Flowmeter), der Sicherheitssensoren (Safety Sensors) und des Start-Tasters (Run Button) aus. Das digitale 24V-Outputmodul schaltet die Sicherheitsverriegelung (Safety Switches), des Trockenluftventils (Dry Air Valve), der Signalsäule (Semaphore) und der Interlockverbindungen des MARTA und der CAEN HV- und LV-Module.

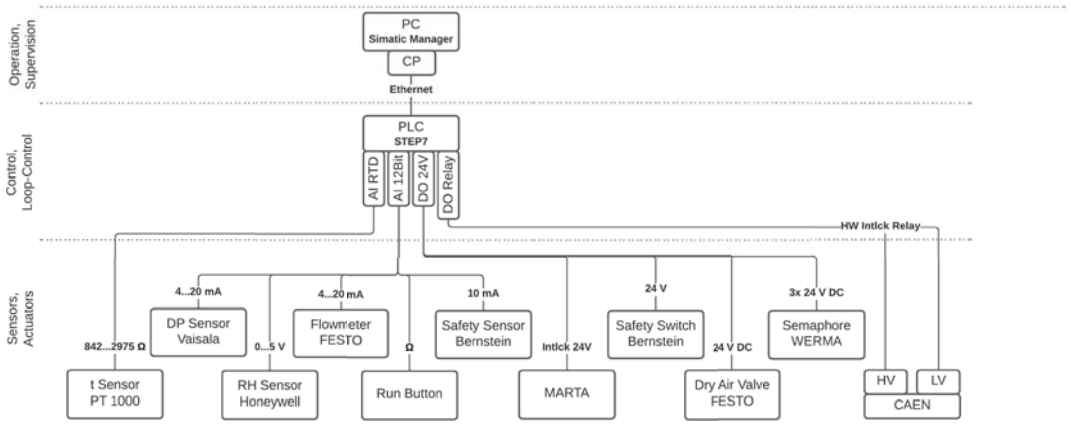

Abbildung 4.1: Die Netzstruktur der Komponenten.

4.2 Implementierung

Der Teststand wird als eine Art von Box aufgebaut (siehe Abbildung 4.2), deren Vorderseite als Ganzes abgenommen werden kann, um die Testobjekte (n) zu platzieren. Direkt unter der Decke verlaufen die Kühlleitungen der Kältemaschine (k). Die abnehmbare Vorderseite wird mit den Sicherheitsschaltern (e) im Testfall auf beiden Seiten verriegelt. Zur Überprüfung, ob die Vorderseite gut positioniert wurde, sind die Türsensoren versetzt an der Ober- und Unterseite angebracht (m). Auf der Oberseite befinden sich außerdem die Signalsäule (a) und ein Kombisensor als Referenz (b). Die übrigen Kombisensoren sind an den Innenseiten der Wände verteilt (g). Auf der linken Seite unmittelbar neben dem Teststand steht ein Schaltschrank, in dem sich die CAEN-Boards (g) und die SPS (d) befinden. Der MARTA für die Kühlung der Sektoren (f) steht hinter dem Teststand, an der Rückführung ist ein PT1000 befestigt, der die aktuelle Temperatur des MARTA misst. Da sich die Trockenluftzufuhr auf der rechten unteren Seite befindet, sind an dieser Stelle auch die Komponenten zur Steuerung angebracht (h). Dies beeinhaltet den Durchflussmesser, den Taupunktsensor und das elektronische Ventil.

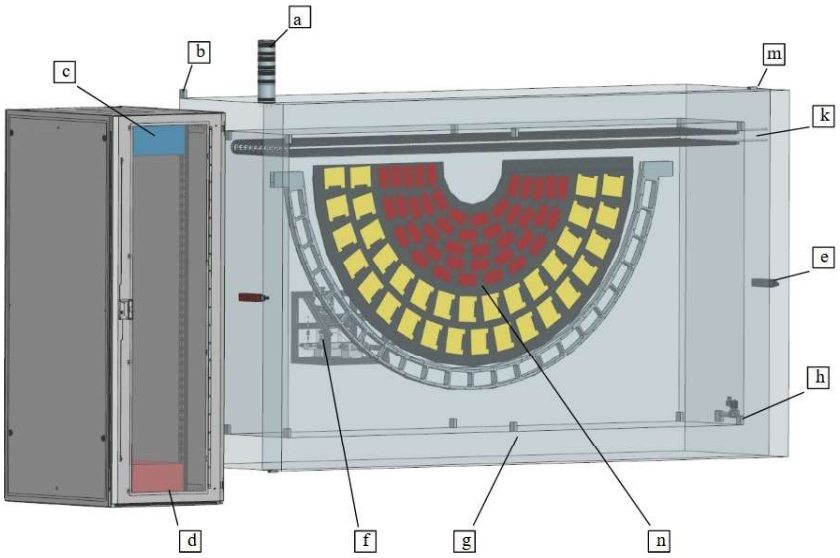

Abbildung 4.2: Modell des Teststandes in isometrischer Ansicht.

Die Komponenten der Trockenluftzufuhr sind in einer bestimmten Reihenfolge angebracht, die die reibungslose Kontrolle durch die SPS gewährleistet (siehe Abbildung 4.3). Von dem Kompressor (Dry Air Compressor) ausgehend, der die getrocknete Druckluft bereitstellt, wird die zugeführte Luft an dem Vaisala-Sensor (Vaisala DP Sensor) vorbei

in das elektronische Ventil (Dry Air Valve) geleitet. Dadurch kann der Taupunkt vor Zufuhr in den Teststand (Setup) überprüft und gegebenenfalls das Ventil geschlossen werden, sollte der Taupunkt über -60°C liegen. Zwischen dem Ventil und dem Teststand passiert die Trockenluft den Durchflussmesser. Dadurch kann überprüft werden, ob das Ventil vollständig geöffnet oder geschlossen ist, in der aktuellen Softwareversion wurde die Logik des Durchflussmessers noch nicht implementiert.

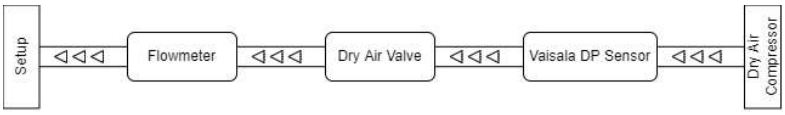

Abbildung 4.3: Der Aufbau der Trockenluftzufuhr.

4.3 Aufbau der Testbox

Für das Testen der Software des zu entwickelnden Sicherheitskonzeptes ist die zuvor errechnete minimale Wartezeit von 30 Stunden hinderlich, weswegen auf die Implementierung des gesamten Systems in einen Prototypen (siehe Abbildung 4.4) ausgewichen wird. Diese wird bezüglich Dichtigkeit, Isolierung und Trockenluftzufuhr nach den gleichen Spezifikationen wie der Teststand für den Sektortest ausgelegt, allerdings mit einem deutlich kleineren Volumen von 173,3 Litern. Die geringe Größe von unter 1% des Teststandes ermöglicht die Testung eines ausgebauten Sektors und eines Sensormoduls (siehe Abbildung 4.5). Die Kühlung der Luft im Inneren wird nur durch den Kühlsektor übernommen, da für die Kühlrippen des Huber kein Platz ist.

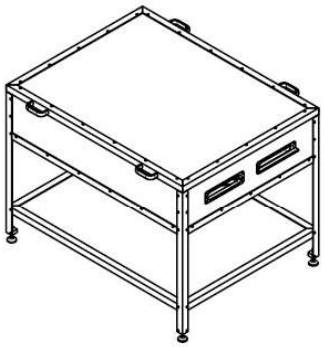

Abbildung 4.4: Isometrische Zeichnung der Testbox.

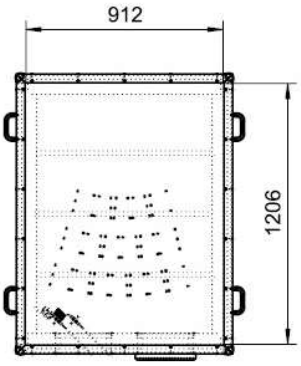

Abbildung 4.5: Ansicht der Testbox von oben mit Kühlsektor.

Durch das geringere Volumen der Testbox wird die minimale Wartezeit für das, nach den Vorgaben in Abschnitt 2.2 simulierte, Erreichen des Taupunktes von -45°C auf knapp über 3 Stunden verkürzt, dies bereits bei einem Zufluss von 100 l/min. Eine sehr hohe Durchflussrate gilt es aufgrund des kleinen Volumens der Testbox zu vermeiden, da der Ausgang der Zuluft sich in unmittelbarer Nähe zu den zu testenden Objekten befindet.

5 Softwarearchitektur

Der Aufbau der Software basiert auf dem Modell des endlichen Zustandsautomaten (englisch: Finite State Machine (FSM)). Die FSM definiert eine endliche Anzahl von Zuständen (states) und allen möglichen Bedingungen für den Übergang (transition) von einem Zustand in den nächsten [22]. Dadurch ist eine präzise Festlegung der Reihenfolge der Zustände möglich. Dies eignet sich für die Anforderung, dass die Vorbereitungsphase abgeschlossen sein muss, bevor der Test starten und der Testzustand nur über einen vordefinierten Prozess verlassen werden kann. Innerhalb eines Zustands werden Anfragen an die Komponenten gestellt, die die Überwachung und Steuerung des Teststandes zum Ziel haben. Der Vorteil der FSM liegt in der eindeutigen Spezifikation und Klassifizierung dieser Zustände, wodurch das Programm einfacher für den*die User*in zu bedienen und zu programmieren ist. Außerdem können die Übergangsbedingungen in einen Zustand eindeutig definiert werden und bestimmte konkurrierende Fälle ausgeschlossen werden. Daher ist die FSM für die sicherheitsrelevanten Anforderungen zum Schutz der Komponenten besonders geeignet.

5.1 Die Finite-State-Machine

Die FSM zur Kontrolle des Teststandes (Control-FSM) wird aus 6 Zuständen aufgebaut, die den Ablauf der Rahmenbedingungen des Sektortests strukturieren. Im stabilen Anfangszustand (STANDBY) kann der Teststand geöffnet und Änderungen an den Testobjekten oder den Komponenten des Teststandes können durchgeführt werden. Zwei Zustände (PREPARE_DP und PREPARE_DP&T) dienen der Vorbereitung des Teststandes auf den Testzustand (TESTING). Ist der Test beendet, kann der Testzustand durch das kontrollierte Herunterfahren (NORMAL_SHUTDOWN) verlassen werden. Dadurch wird wieder der Zustand hergestellt, in dem der Teststand geöffnet werden kann. Wird in einem der Zustände eine Situation erkannt, in dem eine Beschädigung der Testobjekte zu

erwarten ist, wird die Notfallabschaltung (EMERGENCY_SHUTDOWN) begonnen. Die Zustände werden zur Übersichtlichkeit bei 0 startend nummeriert (siehe Tabelle 5.1).

5.1.1 Zustände

In jedem Zustand werden Anfragen an die Aktoren gestellt, die bearbeitet und abhängig von Bedingungen durch die Auslese der Sensoren oder Zustände der Komponenten, bestätigt oder abgelehnt werden. Die Anfragen werden, in einer vordefinierten Reihenfolge, in Form von Funktionsaufrufen gestellt. Das Schema in Abbildung 5.1 gilt für alle verwendeten Zustände, die Variable *state* repräsentiert hierbei keinen Aufruf, sondern ist ein Indikator für den aktuellen Zustand.

STATE	
state	INT
semaphore	COLOR
safteySwitchesOpen	BOOL
dryAirValveOpen	BOOL
caenLVenabled	BOOL
caenHVenabled	BOOL
martaIntlckON	BOOL
Huber Setpoint	*REAL*

Abbildung 5.1: Die Funktionsaufrufe innerhalb eines Zustands.

Die Signalsäule *semaphore* wird zuerst mit einem Farbmodus als Input aufgerufen. Die Signalsäule hat drei LEDs die separat angesteuert werden können. Die SLC-Sicherheitsschalter *safetySwitchesOpen* können entweder geöffnet werden (TRUE) oder geschlossen (FALSE). Dieselbe Logik gilt auch für das Trockenluftventil *dryAirValveOpen*. Die Steuerung der Niedrigvoltspannungsversorgung *caenLVenabled* und der Hochvoltspannungsversorgung *caenHVenabled* richtet sich nach den angeschlossenen Interlockverbindungen, dabei können die Versorgungen entweder aktiviert (TRUE) oder deaktiviert (FALSE) werden. Ist einer der Verbindungen deaktiviert, greift der Hardware-Interlock auf Seiten des zugehörigen CAEN-Boards und schaltet dieses ab. Solange der Interlock aktiv ist und die Verbindung deaktiviert, kann kein CAEN-Board gestartet werden. Für den MARTA-Interlock *martaIntlckON* ist die Logik umgekehrt, eine aktivierte Verbindung (TRUE) setzt ein Interlocksignal in der Firmware des MARTA, ist die Verbindung deaktiviert (FALSE) wird das Interlocksignal zurückgesetzt und der MARTA ist freigegeben. Das Kühlaggregat für die Kühlung des Teststandes kann nicht auf analoger Ebene von der SPS angesprochen werden, daher ist die Variable *Huber Setpoint* als Handlungsempfehlung für den*die Nutzer*in zu verstehen.

Die Implementierung der FSM (siehe Abbildung 5.2) kann effizient als Case-Anweisung in der verwendeten Programmiersprache Structed Control Language (SCL) umgesetzt werden [23]. Wird allerdings die Case-Struktur so geschrieben, dass alle Transitionsbedingungen und Zustandsoperationen aus dem jeweiligen Case heraus bearbeitet werden, so entsteht ein unübersichtlicher Code mit Dopplungen, redundanten Teilen und das Beheben eines Fehlers muss mehrmals durchgeführt werden. Daher wird die Bearbeitung der Anfragen in eigene Funktionen ausgegliedert sowie ein Teil des Funktionen unabhängig von der Control-FSM aufgerufen. Aus diesem Grund sind in der Case-Struktur vor allem die Transitionen und die Aufrufe der verschiedenen Funktionen zu verändern. Die Funktionsaufrufe aus der Control-FSM sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Zustände der Control-FSM und der Aktoren.

State	Number	Semaphore	safetySwitchesOpen	dryAirValveOpen	caenLVenabled	caenHVenabled	martaIntlckON	Huber Setpoint [°C]
STANDBY	0	G	true	false	false	false	false	OFF
PREPARE_DP	1	G/Y	false	true	true	true	false	OFF
PREPARE_DP&T	2	Y	false	true	true	true	false	-25
TESTING	3	R	false	true	true	true	false	-25
NORMAL_SHUTDOWN	4	Y_B	false	true	false	false	false	20
EMERGENCY_SHUTDOWN	5	R_B	false	true	false	false	true	20

[G] green
[Y] yellow
[R] red
[Y_B] yellow blinking
[R_B] red blinking

Erläuterung der Zustände der Control-FSM

0: [STANDBY] Im Startzustand ist die Signalsäule auf Grün, die Sicherheitsschalter geöffnet und das Trockenluftventil geschlossen. Die Dees können gewechselt oder bearbeitet werden, daher sind die Ausgänge der CAEN-Boards deaktiviert. Der MARTA ist nicht im Interlock, da dieser jede Steuerung der Pumpe auch zu Testzwecken verhindern würde. Der Huber sollte in diesem Fall ausgeschaltet sein.
Der Startzustand entspricht dem Initialisierungszustand der SPS, der in diesem Fall auch nach einem Kalt- oder Warmstart der Steuerungseinheit als erstes mit initialisierten Werten aufgerufen wird. Aufgrund des Fehlerfalls 1 (Stromausfall) sind daher die Zustände der Aktoren bei Initialisierung so gewählt, dass eine Beschädigung der Sensormodule durch falsche Anweisungen der kritischen Aktoren möglichst unwahrscheinlich ist.

Tabelle 5.2: Initialwerte der steuerbaren kritischen Aktoren bei Neustart der SPS.

Aktor	Initialwert	Begründung
MARTA	Interlock OFF	Interlock des MARTA kann zu Beschädigung des MARTA selber führen
Trockenluft	Magnetventil geschlossen	Trockenluftzufuhr muss erst auf Feuchtigkeit überprüft werden
CAEN	Deaktiviert	Sensormodule ohne Spannungsversorgung um Spannungsüberhöhung vorzubeugen

Nach dem Start im STANDBY werden automatisch die Bedingungen im Teststand überprüft und die FSM wechselt gegebenenfalls über die erste Transition in der nächsten Zustand.

1: [PREPARE_DP] Der erste Vorbereitungsprozess bereitet den Teststand bezüglich des Taupunktes (DP) auf die Kühlung durch den Huber vor, die Signalleuchte aktiviert die grüne und die gelbe Leuchte. Dazu werden die SLC-Sicherheitsschalter verriegelt und die Trockenluftzufuhr geöffnet, um die Taupunkttemperatur T_d auf unter -20°C zu bringen, die Temperatur, auf die der Huber die Luft im Teststand herunter kühlt. Da der Teststand verriegelt ist, kann die Spannungsversorgung der Sensormodule aktiviert werden, da die Testobjekte mit dem Verschließen des Teststandes verdunkelt werden. Dadurch bietet sich dem*der Nutzer*in des Sektortests die Möglichkeit, die CAEN-Boards ohne das Starten des gesamten Testablaufs zu

testen. Auch im Vorbereitungszustand ist der MARTA-Interlock nicht aktiv und der Huber ist ausgeschaltet.

2: [PREPARE_DP&T] Als nächster Vorbereitungsschritt wird der Taupunkt des Teststandes durch die Zufuhr von Trockenluft aus dem geöffneten Ventil weiter gesenkt. Die Sicherheitsschalter sind zum Schutz der aktivierten CAEN-Module weiterhin verriegelt, die Signalsäule zeigt gelbes Licht an. Jetzt kann der*die Nutzer*in den Huber aktivieren und den Sollwert auf -25°C setzen, dadurch entsteht die Gefahr der Kondensation an Komponenten, die langsamer abkühlen als die sie umgebende Luft. Steigt T_d ungeplant, wird das Herunterfahren eingeleitet.

3: [TESTING] Wenn der Taupunkt unter -45°C T_d gesenkt wurde und die Temperatur der Luft im Inneren unter -20°C liegt, kann der eigentliche Sektortest im Testzustand beginnen. Dazu wird die MARTA-Sektorkühlung bei einem Sollwert von -35°C aktiviert, der MARTA-Interlock ist daher deaktiviert und die Signalleuchte zeigt rotes Licht als Indikator an, da die Testobjekte in diesem Zustand der größten Gefahr durch ungeplantes Eingreifen ausgesetzt sind. Zur Vorbeugung sind die Sicherheitsschalter nach wie vor verriegelt und die Trockenluftzufuhr bleibt geöffnet, um den Taupunkt möglichst niedrig zu halten. Die Spannungsversorgung durch die CAEN-Module ist für den Sektortest aktiviert.

4: [NORMAL_SHUTDOWN] Ist der Sektortest abgeschlossen oder der*die Nutzer*in entscheidet sich zum Abbruch, wird das kontrollierte Herunterfahren gestartet. Die Signalsäule blinkt gelb als Anzeichen dafür, dass der Prozess begonnen hat, aber weiterhin Gefahr für die Testobjekte durch abruptes Öffnen besteht. Die Sicherheitsschalter sind weiterhin verriegelt und die Trockenluft wird über den gesamten Prozess zugeführt, um Kondensation bis zum Ende zu vermeiden. Die Spannungsversorgung der CAEN-Boards wird deaktiviert und der empfohlene Huber-Sollwert wird auf 20°C, die Luftemperatur im, den Teststand umgebenen, Reinraum gesetzt. Der Interlock des MARTA wird nicht aktiviert, da keine akute Kondensationsgefahr besteht und für den MARTA-Sollwert werden ebenfalls die 20°C empfohlen.

5: [EMERGENCY_SHUTDOWN] Wird aus der Control-FSM der Zustand der Notfallabschaltung betreten, bestand direkte und unmittelbare Gefahr, dass die Sensormodule beschädigt werden könnten. Daher wird die Spannungsversorgung deaktiviert und der MARTA-Interlock aktiviert. Die Trockenluftzufuhr bleibt zum sicheren Herunterfahren offen und die Sicherheitsschalter verriegelt. Die Signalsäule blinkt rot, um der*dem Nutzer*in anzuzeigen, dass ein Fehler den Abbruch des

Sektortests bewirkt hat. Der Huber sollte in diesem Zustand zeitnah einen Sollwert von 20°C bekommen.

5.1.2 Transitionen

Die Bedingungen für die Transitioen von einem Zustand in den anderen sind von den Messgrößen der Sensoren oder den Zuständen der Aktoren abgeleitet. Diese sind in Abbildung 5.2 in Form eines Zustandsdiagramms (state diagram) nach Notation der Unified Modeling Language (UML) Version 2.5 dargestellt [24]. Für alle Transitionen gilt, dass die Abfragen der Bedingungen in der Reihenfolge durch die sequentielle Programmierung hierarchisiert sind. Zuerst wird geprüft, ob die Notwendigkeit einer Notfallabschaltung vorliegt, dann ob das kontrollierte Herunterfahren eingeleitet werden soll und als Letztes wird die Vorraussetzung für das Erreichen des nächsten Zustands geprüft. Dadurch wird verhindert, dass zwei konkurriende Bedingungen zu demselben Zeitpunkt anliegen.

A [STANDBY → PREPARE_DP]
Startet der*die User*in die SPS durch Verstellen des Schalters auf "RUN", wird die Control-FSM den Initialisierungszustand STANDBY einnehmen. Um den ersten Vorbereitungszustand PREPARE_DP einzunehmen, muss der Teststand geschlossen werden und die Türsensoren das Verschließen bestätigen (doorSensorsClosed = TRUE).Außerdem muss der*die Nutzer*in den Startknopf aktivieren (runButton = TRUE).

B [PREPARE_DP → ...]
Der Zustand PREPARE_DP kann auf drei verschiedenen Wegen verlassen werden. Entweder der*die Nutzer*in entscheidet sich, den Vorbereitungsprozess abzubrechen (runButton = FALSE), dann wird das kontrollierte Herunterfahren gestartet (NORMAL_SHUTDOWN) oder die Tür wird ungeplant mithilfe eines Schraubendrehers geöffnet (doorSensorsClosed = FALSE) und die FSM begibt sich in die Notfallabschaltung (EMERGENCY_SHUTDOWN). Wenn sich der Teststand nicht im STANDBY Zustand befindet, wird bei Öffnung immer die Notfallabschaltung gestartet, da die CAEN-Ausgänge aktiv sind und daher die Sensormodule lichtempfindlich sind. Werden beide zuvor genannten Bedinungen nicht erfüllt, dann wechselt der Zustand bei Erreichen eines Taupunktes von unter -35°C in den zweiten Vorbereitungszustand PREPARE_DP&T. Auch aus diesem wird bei manueller Öffnung der Teststandes (doorSensorsClosed = FALSE) die

Notfallabschaltung gestartet und bei Abbruch des Vorbereitungsprozesses durch den*die User*in (runButton = FALSE) das kontrollierte Herunterfahren. Steigt der Taupunkt während PREPARE_DP&T über die -20°C, wird ebenfalls der Teststand kontrolliert heruntergefahren, da zwar noch keine Sektoren gekühlt werden und daher keine Gefahr für die Sensormodule besteht, aber der Huber bereits kühlt und daher anfällig für Kondensation ist.

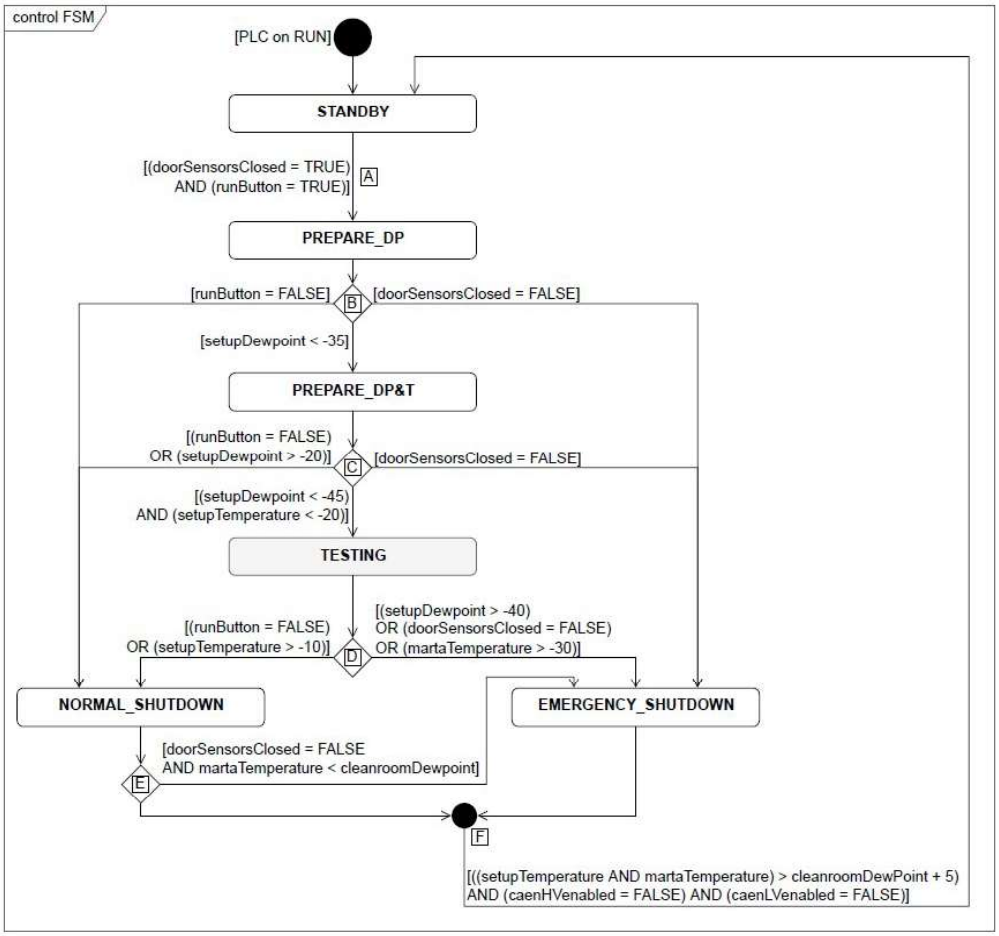

Abbildung 5.2: Die Control-FSM der Ablaufkontrolle.

C [PREPARE_DP&T → ...]
Aus dem zweiten Vorbereitungsprozess kann wie schon im ersten das kontrollierte Herunterfahren durch Deaktivierung des Startknopfs (runButton = FALSE) erreicht werden. In diesem Fall allerdings auch dadurch, dass der Taupunkt im Teststand (setupDewpoint) über die Temperatur der Kältemaschine von -20°C steigt. Wurde keine der Bedingungen für das Herunterfahren oder die Notfallabschaltung erfüllt, dann erreicht die Control-FSM

den Testzustand (TESTING) wenn der Taupunkt unter -45°C T_d und die Lufttemperatur im Teststand unter -20°C liegt.

D [TESTING → ...]
Im Testzustand ist es wichtig, alle am Sektortest beteiligten Komponenten zu überwachen und die Testobjekte vor Beschädigung zu schützen. Daher wird durchgehend der Taupunkt im Teststand und der Status der Türsensoren überprüft. Bei der Überwachung des Taupunktes wird ab Erreichen des Testzustands darauf geachtet, dass der Taupunkt nicht um mehr als 5°C steigt (Fehlerfall 7). Steigt der Taupunkt über -40°C T_d, beispielsweise durch eindringende Feuchtigkeit (Fehlerfall 3), kommt es zu Öffnung des Teststandes (Fehlerfall 4) oder die Temperatur der MARTA steigt über -30°C (Fehlerfall 9) wird TESTING verlassen und die Notfallabschaltung (EMERGENCY_SHUTDOWN) beginnt. Wenn der Sektortest abgeschlossen ist, kann der Testzustand durch Deaktivieren des Startknopfes verlassen werden. Dadurch wird das kontrollierte Herunterfahren gestartet, das auch durch das Steigen der Luftemperatur, ausgelöst durch ein Fehler der Kältemaschine (Fehlerfall 5), über -10°C erreicht wird.

E [NORMAL_SHUTDOWN → ...]
Während der Teststand heruntergefahren wird, besteht ein Restrisiko für die Testobjekte, solange die Kühltemperatur des MARTA (martaTemperature) noch unter dem Taupunkt des Reinraums (cleanroomDewpoint) liegt und der Teststand geöffnet wird. Passiert es, dass die Türsensoren eine Öffnung anzeigen und die Temperatur des MARTA kleiner ist als die Taupunkttemperatur T_d des Reinraums, wird in die Notabschaltung gewechselt. Das Herunterfahren ist abgeschlossen, wenn die Temperatur der Luft im Inneren des Teststandes (setupTemperature) und die Kühltemperatur des MARTA oberhalb der Taupunkttemperatur T_d im Reinraum liegen. Außerdem muss sowohl die Niedrigvolt- als auch Hochvoltversorgung abgeschaltet sein, erst dann kann der Startzustand STANDBY erreicht werden, in dem der Teststand geöffnet werden kann.

F [EMERGENCY_SHUTDOWN → STANDBY]
Die Notfallabschaltung kann nur in Richtung des Startzustands verlassen werden. Das setzt voraus, dass die Bedingungen im Inneren des Teststandes so stabil sind, dass die Testobjekte durch das mögliche Öffnen im STANDBY nicht beschädigt werden. Wie im NORMAL_SHUTDOWN müssen hierzu die Temperaturen des Teststandes (mar-

ta/setup) über der Taupunkttemperatur T_d der Umgebung im Reinraum liegen und die CAEN-Spannungsversorgung muss deaktiviert sein.

Die übersichtliche Anzahl an Zuständen und Transitionen in der Control-FSM macht einen Deadlock auf Seiten der Programmierung unwahrscheinlich. Ein Deadlock ist das Erreichen eines Zustands, in dem keine Transition aktiviert werden kann, um diesen zu verlassen [25]. Zusätzlich können die Zustände STANDBY, PREPARE_DP, PREPARE_DP&T und TESTING immer über eine Änderung des Startknopfs oder der Türsensoren verlassen werden, was Deadlocks durch Reduktion der Transitionsbedingungen vermeidet.

5.2 Implementierung

Für die Programmierung der SPS wird die Software Simatic Manager Step 7 von Siemens in der Version V5.7 (2021) verwendet [26]. Diese hat im Vergleich zum neueren TIA-Portal von Siemens [27] den Vorteil, dass die verwendeten SPS-Module alle problemlos implementiert werden können. Da speziell die S7-300 und dazugehörige Module ein Auslaufmodell sind, wurden einige Konfigurationen nicht in das TIA-Portal übernommen.

5.2.1 Software Interlocks

Die Logik der Aktoren im Teststand wird komplett in der FSM implementiert, dort wird gesteuert, wann ein Aktor aktiviert oder deaktiviert wird. Dies wird für die besonders sensiblen Komponenten durch ein zweites Sicherheitsnetz ergänzt, um eine möglichst große Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems zu gewährleisten. Die sensiblen Komponenten sind die CAEN-Spannungsversorgung, der MARTA, die Trockenluftzufuhr und die Türverriegelung, diese hätten bei Fehlern die direkte Beschädigung der Sensormodule zur Folge. Das zusätzliche Sicherheitsnetz besteht aus Software Interlocks (SI) die, in Form von Permits (Genehmigungen), die Aktivierung der erwähnten Komponenten entweder erlauben (Permit_... = TRUE) oder die sofortige Deaktivierung veranlassen (Permit_... = FALSE).

Die Logik der SI wird als Baum-Struktur (Tree) implementiert (siehe Abbildung 5.3). Dabei sind die Blätter (Leaf) Messwerte der analogen Sensoren (siehe Abbildung 5.4), die mit Grenzwerten verglichen einen boolschen Zustand einnehmen, dabei werden die Operatoren $<$, $>$ und $=$ verwendet. Der Stamm (Trunk) beinhaltet bereits die Permits, die entweder direkt den Zustand eines Leafs übernehmen oder mehrere per AND verknüpfen. Die höchste Stufe des Trees sind die Freigaben in Form von Action Lists. Dabei kann nur eine Komponente durch den aktiven Permit freigegeben

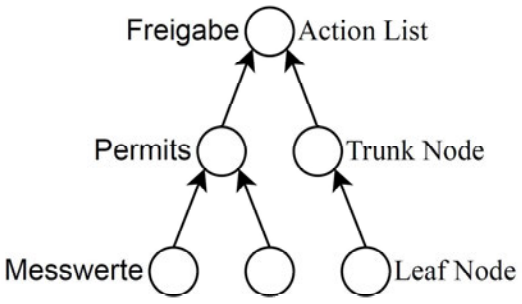

Abbildung 5.3: Die Permit Tree Logik.

werden oder mehrere Komponenten die gegebenenfalls noch Abhängigkeiten untereinander besitzen [28].

Die Genehmigung Permit_SectorTestLocked ist gleichbedeutend mit einer Statusmeldung, ob der Teststand geschlossenen und verriegelt ist. Wenn sowohl die Türsensoren anzeigen, dass sie geschlossen sind (doorSensorsClosed = TRUE), als auch die SLC-Sicherheitsschalter verriegelt sind (safetySwitchesOpen = FALSE), kann die Spannungsversorgung der CAEN-Boards aktiviert werden. Außerdem kann das Permit die Control-FSM in die Notfallabschaltung bringen.

Solange der Taupunkt des Teststandes unter -40°C T_d liegt, ist Permit_SectorCooling aktiv und in diesem Fall ist es möglich, den MARTA zu nutzen, das Entziehen des Permits führt unter der Bedingung, dass die MARTA-Temperatur zu niedrig ist, zu dem Hardware-Interlock des MARTA.

Das Permit_DryAirValve genehmigt die Öffnung des Trockenluftventils, wenn der Taupunkt der Trockenluft nicht über -60°C T_d steigt. Diese Bedingung greift auch dann, wenn der Trockenluft-Kompressor fehlerhaft ist oder ausfällt, wie in Fehlerfall 2 aufgezeigt.

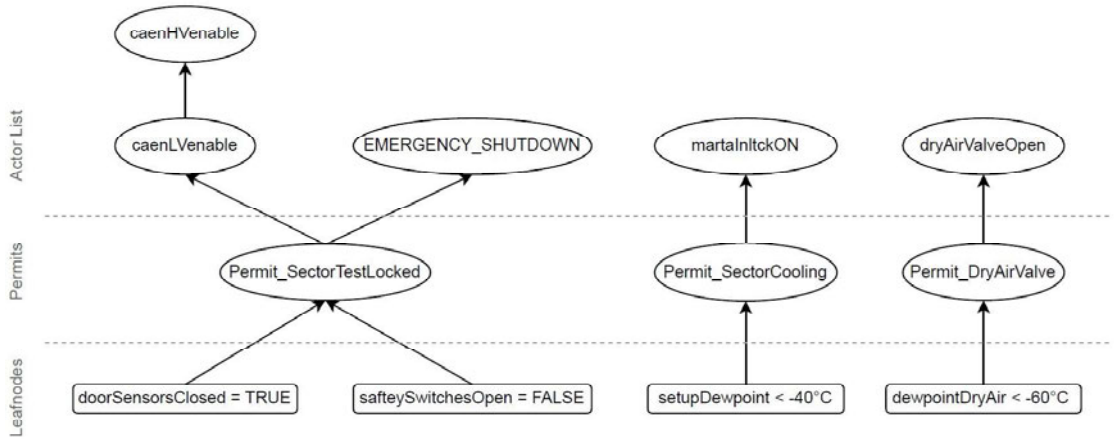

Abbildung 5.4: Der Permit Tree der Software Interlocks.

5.2.2 Programmablauf

Die Programmstruktur ist im Organisationsbaustein OB1 hinterlegt, aus diesem werden pro Zyklus einmal die Funktions-Blöcke FC10, FC11, FC12, FC13 und FC50 in dieser Reihenfole aufgerufen (siehe Abbildung 5.5).
Zuerst wird die Control-FSM aufgerufen (FC10) in dieser werden über das Prinzip der State Machine die Zustände der Kontroll-und Überwachungssoftware verwaltet. Dazu nutzt FC10 (FSM Control) den Daten-Block DB1. In diesem werden Informationen und Parameter gespeichert, die zur Steuerung des Programms wichtig sind, aber nicht aus Sensoren oder Aktoren ausgelesen werden. Die Case-Anweisung, die das Zentralstück der FC10 bildet, arbeitet in jedem Case fünf Funktionsaufrufe in einer vordefinierten Reihenfolge ab. Die Signalsäule erhält über FC20 (Semaphore) die zu dem jeweiligen Zustand passende Anfrage, die Farben entsprechend zu schalten. Befindet sich die Control-FSM im Zustand 4 oder 5, wird zusätzlich die Funktion FC21 (Blinker) genutzt, um ein blinkendes Warnlicht zu erzeugen. Nach der Signalsäule erhält die Funktion FC30 (Safety Switches) einen Bool-Wert als Parameter, dadurch werden die Sicherheitsschalter geschlossen [FC30(FALSE)] oder geöffnet [FC30(TRUE)]. Der Schließzustand wird in DB1 gespeichert. Der Aufruf der FC40 (Dry Air Valve) wird ebenfalls mit einem boolschen Parameter versehen, TRUE soll hierbei die Öffnung bewirken und FALSE die Schließung des Trockenluftventils. Das Ventil kann allerdings nur geöffnet werden, wenn der Taupunkt der Trockenluft unter -60°C T_d liegt. Außerdem wird bei erstmaliger Verwendung eine Spülzeit von 10 Sekunden vor dem ersten Überprüfen des Taupunktes abgewartet. Die Information über den Status wird in DB1 gespeichert, für den Timer werden Hilfsvariablen aus DB3 genutzt. Für die Steuerung des MARTA wird die FC60 aufgerufen, der Übergabewert ist die Forderung, das Interlock-Signal zu aktivieren oder zu deaktivieren.

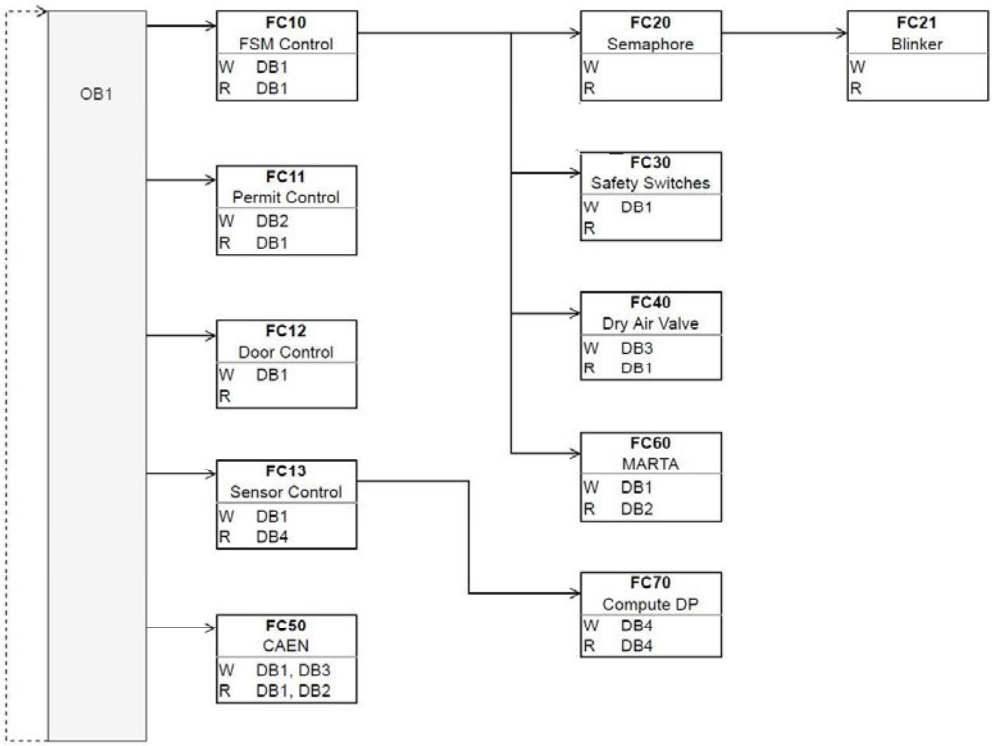

Abbildung 5.5: Die Organisationsstruktur der Software.

Nach dem Aufruf der Control-FSM werden aus dem OB1 Funktionen aufgerufen, die unabhängig vom Zustand des Teststandes agieren. Zunächst wird die FC11 (Permit Control) aufgerufen, die kontinuierlich die Bedingungen der Permits unter anderem aus DB1 überprüft und den Status der Permits im Permit-Datenblock DB2 speichert. Diese können dann von OB1 zur Steuerung der Aktoren (FC20, FC30, FC40, FC60) und von FC50 zur Steuerung der CAEN-Boards genutzt werden. Die Funktion FC13 (Sensor Control) liest die analogen Sensoren an den Inputmodulen aus, konvertiert die Daten in ein nutzbares Format und berechnet mithilfe von FC70 (Compute DP) den Taupunkt aus den Messwerten der Sensoren für Temperatur und relative Feuchtigkeit. Diese Werte werden zur leichteren Verarbeitung in DB1 ebenfalls gespeichert. Den Schluss der Aufrufliste bildet der FC50 (CAEN), der den Status der CAEN-Boards verwaltet und gegebenenfalls die Hardware-Interlock Verbindung aktiviert oder deaktiviert. Dazu wird eine FSM verwendet, die sicherstellt, dass die HV-Boards nur aktiv sein können, wenn die LV-Boards ebenfalls aktiv sind.

6 Testläufe

Während der Entwicklung der Software für eine SPS mit Step7 von Siemens ist das Testen einzelner Programmabschnitte durch die Verwendung von Variablen-Tabellen möglich. Dort werden globale Variablen aus den Datenblöcken, die Eingänge der Inputmodule und die Ausgänge der Outputmodule aufgelistet. Während das Programm auf der realen SPS oder dem Simulator PLCSim läuft, können dadurch die Variablen beobachtet und modifiziert werden, um einen bestimmten Ablauf zu testen. Dies ist für den*die Nutzer*in mit relativ viel Aufwand verbunden, da bei jeder Änderung eines Wertes dieser manuell eingetragen werden muss. Zur Minimierung des Aufwands kann die Funktion FC100 (TestFunc) genutzt werden, die einen automatischen Softwaretest durchführt.
Die SPS, die Sensoren und die Aktoren wurden zu Testzwecken an und in dem Prototypen (siehe Abschnitt 4.3) nach den Vorgaben des Testandes (siehe Abschnitt 4.2) platziert. Um die Funktionalität der Hardware zu testen, werden alle Zustände und Transitionen der Control-FSM durchgespielt, allerdings ohne Testobjekte, damit diese nicht beschädigt werden, sollte der Test einen Fehler in dem Sicherheitssystem offenbaren.

6.1 Softwaretest

Wird FC100 aus dem OB1 aufgerufen, während FC12 (Door Control) und FC13 (Sensor Control) deaktiviert sind und die Sensorwerte dadurch überschrieben werden können, startet ein Testprogramm, dass die Funktionalität der Software nach den Anforderungen aus Kapitel 2 testet.

Der Test selber besteht aus zwei Teilen, einmal wird der aktuelle Zustand darauf getestet, ob die Digitalausgänge die korrekten Werte aufweisen, wie sie anhand der Anforderungen in der aktuellen Version der Control-FSM definiert wurden. Dann wird die zuletzt durchgeführte Transition überprüft. Ist der jeweilige Zustand oder die Transition korrekt

ausgeführt worden, wird eine entsprechende boolsche Variable in einem für den Test erstellten Datenblock (DB100) auf TRUE gesetzt. Sind alle dieser Variablen TRUE, wird abschließend eine Variable für den gesamten Test auf TRUE gesetzt, die anzeigt, ob der Test zu Ende geführt werden konnte und ob er erfolgreich verlaufen ist.

Damit der*die Nutzer*in nicht die Variablen manuell modifizieren muss, werden die Messparameter des Teststandes überschrieben und jeder Zustand und jede Transition kann sukzessive aktiviert werden. Die Modifikationen der Messparameter werden in Test-Cases organisiert, jeder Case spielt ein theoretisches Szenario bei der Benutzung des Teststandes durch. Ist ein Test-Case abgeschlossen, wird automatisch der nächste aufgerufen und durchgeführt.

6.2 Hardwaretest

Nach dem Abschluss der Tests der Software wurde die SPS sowie die gesamte Aktorik und Sensorik zu Testzwecken an der Testbox installiert. Dadurch konnte die Funktionalität eines Kombisensors und des Vaisala-Taupunktsensors überprüft und die Messwerte mit einem portablen Taupunktmessgerät validiert werden. Der Temperatursensor für den MARTA, die Türsensoren und der Startknopf wurden ebenfalls geprüft und softwareseitig eingebunden. Auf der Seite der Aktoren konnten die Signalsäule, die Sicherheitsschalter und das Trockenluftventil erfolgreich getestet werden, indem softwareseitig die Sensorik deaktiviert wird und alle Zustände und Transitionen der Control-FSM simuliert werden. Der Interlock-Stecker des MARTA hat auf der Seite der SPS funktioniert, allerdings konnte kein Interlock Signal in der Firmware des MARTA festgestellt werden. Dies kann entweder daran liegen, dass die aktuelle Firmware Version bereits veraltet ist oder, dass der Hardware-Interlock Stecker nicht mit der entsprechenden Logik verbunden ist. Bei den CAEN-Boards wurde die Interlock-Funktionalität SPS-seitig getestet und über das Controlpanel überprüft. Die Hochvoltversorgung, deren Kontrolle für den Testbetrieb besonders kritisch ist, hat das Interlock-Signal problemlos angenommen, wohingegen die Niedrigvoltversorgung keines erkennen konnte. Dies liegt wahrscheinlich an einer falschen Konfiguration des Steckers. Um das Sicherheitssystem in Betrieb nehmen zu können, muss noch die Simulation der Realbedingungen durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die CMS-Gruppe am DESY wird vorraussichtlich im Sommer 2023 mit den Sektortests beginnen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein autonom arbeitendes Sicherheitssystem entwickelt, dass auf Basis von Hardware- und Software-Interlocks über eine SPS mit dazugehöriger Sensorik und Aktorik den sicheren Testbetrieb garantiert und die Testobjekte damit vor Beschädigung schützt. Die Logik des Testprozesses mit Vorbereitung, Testzustand und Herunterfahren beziehungsweise Notfallabschaltung ist in einer FSM realisiert. Zur Validierung der Funktionalität des Programms wurden Software- und Hardwaretests durchgeführt. Der nächste Schritt ist die vollständige Installation aller Komponenten an der Testbox und die Simulation des Testprozesses unter Realbedingungen. Wenn der endgültige Teststand fertiggestellt ist, kann der Installationsaufbau von der Testbox übertragen werden, trotzdem sollte vor Durchführung des ersten Sektortests als Abschlusstest der komplette Prozess am Teststand ohne Testobjekte simuliert werden.

Der Aufbau des Teststandes soll auch nach Abschluss der Sektortests weiterhin verwendet werden, um licht- und feuchtigkeitssensible Objekte sicher testen zu können. Zur genaueren Überwachung des Taupunktes sollten daher weitere Kombisensoren in dem Teststand installiert werden. Zur Optimierung der aufzuwendenden Zeit für einen Test könnte die zugeführte Trockenluft mithilfe des Hubers vorgekühlt werden und mehrere Einspeisungen über den Teststand verteilt installiert werden. Während der Inbetriebnahme sollten die Schwellwerte der Sensoren überprüft und gegebenenfalls softwareseitig angepasst werden.

Damit die Verwendung des Teststandes unkomplizierter möglich ist, könnte das Programm mit einem Graphical User Interface (GUI) verstärkt werden, um dem*der Nutzer*in des Sektortests den einfachen Zugriff auf alle Komponenten und Prozessparameter zu ermöglichen. Als Basis bietet sich das Visualisierungstool WinCC von Siemens an, dass bereits in ähnlichen Anwendungen erfolgreich genutzt wurde [10]. Darin sollte die Taupunkt- und Temperaturentwicklung über alle Sensoren gemittelt abhängig von der vergangenen Zeit dargestellt, sowie der Taupunkt und die Temperatur an den jeweiligen

Sensoren, mit der Position im Teststand, visualisiert werden. Per WinCC ist darüber hinaus die Kommunikation mit dem MARTA und dem Huber möglich, wodurch diese automatisiert einen Sollwert erhalten könnten und dieser mit dem aktuellen Wert verglichen dargestellt wird. Des Weiteren sollten in dem GUI der Status der CAEN-Boards, der Trockenluftzufuhr und der Türsensoren ersichtlich sein und der aktuelle Zustand des Teststandes über ein Message Board kommuniziert werden.

Um das Verhaltens des Teststandes bezogen auf einen möglichen längeren Ausfall des Sicherheitssystems zu überprüfen, könnten Langzeittests des MARTA, des Hubers und der Dichtungen sowie der Trockenluftzufuhr durchgeführt werden. Durch den Vergleich der Erwärmungsrate der Kühlaggregate und der Testobjekte sowie des zeitlichen Verlaufs des Taupunktes im Teststand, wenn keine Trockenluft mehr zugeführt wird, würde Aufschluss darüber geben, ob die Konstruktion des Teststandes Eigensicherheit gewährleisten kann.

Literaturverzeichnis

[1] Weltmaschine - large hadron collider(lhc). https://www.weltmaschine.de (Zugriff: 21.10.2022).

[2] Detector assembly facility nimmt betrieb auf. https://www.desy.de/aktuelles/news_suche/index_ger.html?openDirectAnchor=1398 (Zugriff: 18.12.2022).

[3] Łukasz Klimczyk Ryszard Kantor. *User's Manual for MARTA 2.0.*

[4] CAEN GmbH. *A251x Series 50W LV Boards User Manual.* www.caen-de.com.

[5] CAEN GmbH. *A7435 AG7435 24 Channel 3.5 kV/3.5 mA (9W) Power Supply Boards.* www.caen-de.com.

[6] Peter Huber Kältemaschinenbau AG. *Unistat 525w.* www.huber-online.com.

[7] Michel Instruments. *S8000 -100 | High-Precision Chilled Mirror Hygrometer.* www.michell.com.

[8] CS Instruments. *FA 500 Dew Point Sensor.* www.cs-instruments.com.

[9] Nick Thamm. Design and commissioning of a temperature-controlled readout station for cms 2s modules.

[10] A Dierlamm, G H Dirkes, M Fahrer, M Frey, F Hartmann, L Masetti, O Militaru, S Y Shah, R Stringer, and A Tsirou. The cms tracker control system. *Journal of Physics: Conference Series*, 119(2):022019, jul 2008.

[11] Mark G. Lawrence. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2):225–234, 2005.

[12] Robert E. Eskridge Oleg A. Alduchov. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35(4):601–609, 1996.

[13] Bsi standard 200-3, risikoanalyse auf der basis von it-grundschutz. Technical Report V1.0, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn, DE, November 2017.

[14] *Proceedings of ICALEPCS2015: Personnel Safety and Machine Protection*, number MOPGF132. CERN, Geneva, Switzerland, 2015.

[15] Siemens AG. *Programming with STEP 7*.

[16] Honeywell International Inc. *HIH-4000 Series / Humidity Sensors*. www.honeywell.com/sensing, Februar 2010.

[17] Vaisala. *Taupunktmesswertgeber DMT143 für OEM-Anwendungen*, 2020.

[18] Bernstein AG. *Berührungsloser Sicherheitssensor SRF*. www.bernstein.eu.

[19] WERMA Signaltechnik GmbH + Co. KG. *698/699*. www.werma.com.

[20] Bernstein AG. *Sicherheitsschalter / Baureihe SLC*.

[21] Festo SE + Co. KG. *Magnetventil VZWF-B-L-M22C-G38-135-1P4-10*.

[22] Evelin Engler, Michael Baldauf, Frank Sill Torres, and Stephan Brusch. Finite State Machine Modelling to Facilitate the Resilience of Infrastructures: Reflections. *Infrastructures 2020*, 5(24):1–20, 2020.

[23] Jilles van Gurp and Jan Bosch. On the implementation of finite state machines. 01 1999.

[24] oose Innovative Informatik GmbH. *UML 2.5 Notationsübersicht*. http://www.oose.de/uml.

[25] Andrei Karatkevich and Iwona Grobelna. Deadlock detection in petri nets: One trace for one deadlock? 06 2014.

[26] Step 7 v5.x. https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/5000139#Overvie (Zugriff: 30.12.2022).

[27] Totally integrated automation portal. https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrie-software/automatisierungs-software/tia-portal.html (Zugriff: 30.12.2022).

[28] *Proceedings of IPAC2017*, number TUPIK063. NSRL, USTC, Hefei, Anhui 230029, China, 2017.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

Ort | Datum | Unterschrift im Original