Weiterentwicklung der Anlagensteuerung der Fertigungsstraße im PTZ

Studienarbeit T3200

des Studienganges Elektrotechnik - Automation

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg Campus Friedrichshafen

von

David Weberbauer, Robin Wörner, Aaron Gräf

12.07.2025

Bearbeitungszeitraum	07.04.2024 - 12.07.2025
Matrikelnummer	8113187, 3062326, 8254936
Kurs	TEA22
Gutachter der Dualen Hochschule	Edvin Hamzic

Erklärung

Gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3,4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017 in der Fassung vom 25.07.2018:

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema:

Weiterentwicklung der Anlagensteuerung der Fertigungsstraße im PTZ

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Friedrichshafen, 12.07.2025
Ort, Datum

David Weberbauer	Robin Wörner	Aaron Gräf

Zusammenfassung

Diese Arbeit ist die Fortsetzung der T3100 mit dem Titel „*Bestandsaufnahme der Anlagensteuerung der Fertigungsstraße im PTZ*“ aus dem Jahre 2024.

Diese Arbeit bearbeitet die Ausarbeitung einer Fertigungsstraße, die in größerem Maßstab in der Industrie vorkommen könnte. Es werden grundlegende und weiterführende Themen behandelt, die zu dem Betreiben einer Anlage gehören. Dazu zählen die Bedeutung von Industrie 4.0, der Automatisierungspyramide und deren Zusammenhang mit Sensoren und Aktoren, Steuerungen und deren Funktionsweise, sowie weiterführende Elemente wie Edge Computing und MES-Systemen. Diese Themen, ihre Bedeutung und ihren Stellenwert im heutigen Industriestandart werden genau erörtert. Erkenntnisse, die in der vorherigen Studienarbeit gesammelt werden konnten und Konzepte, die ausgearbeitet wurden, werden weiter überarbeitet und in Ergebnisse umgesetzt.

Mit der Weiterentwicklung der SPS-Architektur beginnt der Ergebnisteil. Es wird im Detail erklärt, welche Änderungen im Programm der SPS vorgenommen wurden. Vom nahezu vollständigen Löschen des Programms bis hin zu einer Programmierung, die die Basis für zukünftige Arbeiten legt. Das Programm wird im Detail erklärt und damit die klare Struktur und Herangehensweise sichtbar.

Im weiteren Verlauf ist die Installation einer Edge verortet, wie sie installiert, konfiguriert und genutzt werden kann. Es werden Nutzen und Möglichkeiten dieses Systems, besonders in Verbindung mit einem MES geschildert.

Die erarbeiteten Ergebnisse, deren Validierungsverfahren und Funktionstest sind die anschließenden Themen. Es wird gezeigt, dass die Anlage viele Parallelen zu einer echten Anlage aufzeigt und die Inbetriebnahme ähnlichen Mustern folgt. Vom Ausarbeiten von Konzepten, über das Planen, Umsetzen, Testen und der Fehlerbehebung. Diese Schritte sind wesentliche Bestandteile des Lebenszyklus einer Anlage.

Abschließend werden die Erkenntnisse und die Probleme dargelegt, welches Wissen aus den Theoriephasen hilfreich war und wie die Zukunft der Zukunftsfabrik gestaltet werden könnte.

Abstract

This thesis is a continuation of the T3100 titled " *Bestandsaufnahme der Anlagensteuerung der Fertigungsstraße im PTZ* " from 2024.

The present work focuses on the development of a production line that could be found in large-scale industrial settings. It addresses both fundamental and advanced topics related to operating an industrial system. These include the significance of Industry 4.0, the automation pyramid and its relation to sensors and actuators, control systems and how they work, as well as advanced components such as edge computing and MES (Manufacturing Execution Systems). These topics, their importance, and their relevance in today's industrial standards are discussed in detail.

Insights gained from the previous thesis and the concepts developed there are further refined and translated into practical results.

The results section begins with the further development of the PLC architecture. It explains in detail which changes were made to the PLC program—from almost completely deleting the existing code to programming a new system that serves as a foundation for future work. The program is explained in depth to make its structure and the systematic approach clearly visible.

In the following part, the installation of an edge device is described, including how it is installed, configured, and used. The benefits and possibilities of this system—especially in connection with an MES—are outlined.

The developed results, their validation methods, and functional testing are the next topics covered. It is demonstrated that the system shares many parallels with an industrial setup and that its commissioning follows similar patterns—from developing concepts to planning, implementation, testing, and troubleshooting. These steps are essential components of a system’s life cycle.

Finally, the findings and encountered challenges are discussed, including which knowledge from theoretical phases proved helpful and how the future of the “Zukunftsfabrik” could be shaped.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung 2

2. Theoretische Grundlagen 3

2.1 Industrie 4.0 – Begriff und Bedeutung 3

2.2 Die Automatisierungspyramide 7

2.3 Sensorik und Aktorik in der modernen Produktion 10

2.4 Funktionsweise und Aufbau speicherprogrammierbarer Steuerungen 13

2.4.1. Hardwareaufbau einer SPS 13

2.4.2. Steuerung und Verarbeitung von Daten 14

2.4.3. Programmablauf und Zykluszeit 15

2.4.4. Das EVA-Prinzip am Beispiel SPS 17

2.5 Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen in der industriellen Automatisierung 19

2.6 Manufacturing Execution System (MES) 22

2.7 EDGE Computing 24

3. Weiterentwicklung der SPS-Architektur 29

3.1 Konzept 29

3.2 Auftragsverwaltung 30

3.3 Stopper Kontrolle 32

3.4 Station 1 33

3.5 Station 2 35

3.6 Station 3 35

3.7 Station 4 36

3.7 Station 5 38

3.8 Station 6 40

3.9 Magazine 43
4. Umsetzung der MES-Anbindung mit Forcam 46
4.1 Forcam-Edge Installation und Konfiguration 46
4.2 Fazit der Forcam Edge 49
4.3 Ausblick Forcam Edge 50
5. Ergebnisse und Validierung 51
5.1 Funktionsprüfung der SPS-Architektur 52
5.2 Funktionstests der Auftragsabwicklung 52
5.3 Bewertung der Verbesserungen 53
6. Fazit und Ausblick 54
7. Abbildungsverzeichnis 56
8. Abkürzungsverzeichnis 57
9. Literaturverzeichnis 60

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die fortschreitende Digitalisierung hat die industrielle Produktion grundlegend verändert und den Weg für das Konzept der Industrie 4.0 bereitet. In diesem Zusammenhang gewinnen automatisierte, vernetzte und selbststeuernde Systeme zunehmend an Bedeutung. Durch die intelligente Verknüpfung von Robotik, Sensorik und Steuerungstechnik lassen sich Produktionsprozesse deutlich flexibler und effizienter gestalten. Die umfassende Vernetzung von Maschinen, Anlagen und IT-Systemen stellt dabei ein zentrales Element der Industrie 4.0 dar, da sie eine durchgängige Automatisierung sowie eine kontinuierliche Überwachung und Steuerung in Echtzeit ermöglicht. Dies trägt maßgeblich dazu bei, Prozesse zu optimieren, Stillstands Zeiten zu reduzieren und die Gesamteffizienz industrieller Anlagen zu steigern [1].

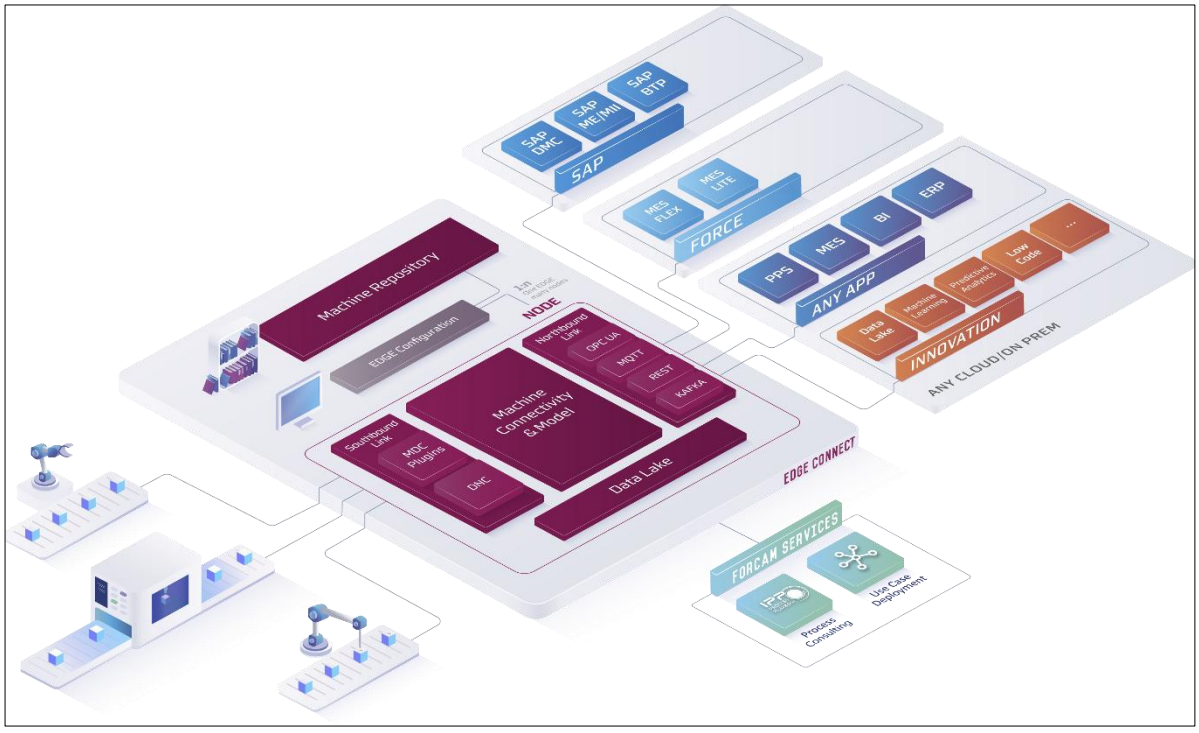


Abbildung 1: SPS, MES und Data Connection [51]

Die Automatisierung und Vernetzung von Produktionssystemen ist nicht nur für die Optimierung bestehender Prozesse notwendig, sondern auch für die Anpassung an die

steigenden Anforderungen in einer globalisierten und wettbewerbsintensiven Wirtschaft. Die erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0-Technologien ist eine Voraussetzung, um in der modernen Fertigung wettbewerbsfähig zu bleiben, da sie eine hohe Flexibilität und Effizienz ermöglicht. [2]

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die bestehende SPS-Architektur einer Produktionslinie im Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) zu optimieren und weiterzuentwickeln. Der Fokus liegt auf der Integration von Robotik, Sensorik und der Erstellung einer wartungsfreundlichen und zukunftsfähigen Programmstruktur, um eine synchronisierte Steuerung und effiziente Koordination aller Fertigungsstationen zu gewährleisten. Besonderer Schwerpunkt ist die Anpassung der SPS-Architektur, sodass alle Stationen simultan arbeiten und ein Fertigsignal senden können, um eine präzise Synchronisation und verbesserte Prozesssicherheit zu erreichen. [3]

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Implementierung der FORCAM EDGE CONNECT-Lösung (vgl. Abb. 1). Diese ermöglicht die nahtlose Integration heterogener Maschinenparks, unabhängig von Alter oder Hersteller. Durch die Erfassung und Harmonisierung von Maschinendaten in Echtzeit wird eine transparente und effiziente Fertigung ermöglicht. Die Lösung bietet eine standardisierte Schnittstelle, die eine einfache Anbindung an bestehende IT-Systeme wie MES oder ERP ermöglicht und so die Grundlage für eine vernetzte und datengetriebene Produktion schafft. [4]

Zusätzlich wird ein Manufacturing Execution System (MES) entwickelt, das als Bindeglied zwischen der Produktionssteuerung und der Managementebene fungiert. Dieses System ermöglicht eine Echtzeitüberwachung der Fertigung, die Analyse von Produktionsdaten und die Optimierung von Prozessen. Ziel ist es, eine flexible und skalierbare Produktionslinie zu schaffen, die den Anforderungen der Industrie 4.0 gerecht wird und Raum für zukünftige Erweiterungen bietet [2].

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Industrie 4.0 – Begriff und Bedeutung

Der Begriff „Industrie 4.0“ beschreibt den aktuellen Trend zur umfassenden Digitalisierung und Vernetzung industrieller Wertschöpfungsketten. Er wurde erstmals im Jahr 2011 im Rahmen der Hannover Messe öffentlich verwendet und seither kontinuierlich weiterentwickelt. Eine zentrale Definition wurde 2013 von der Forschungsunion Wirtschaft–Wissenschaft gemeinsam mit der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) veröffentlicht [5]. Darin wird Industrie 4.0 als vierte industrielle Revolution verstanden, die auf der digitalen Transformation industrieller Prozesse basiert und eine tiefgreifende Veränderung bestehender Produktions- und Organisationsstrukturen zur Folge hat. Im Mittelpunkt steht die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologien in die klassische Automatisierungstechnik, mit dem Ziel, intelligente, selbststeuernde und sich adaptiv optimierende Produktionssysteme zu schaffen. [5] [6]

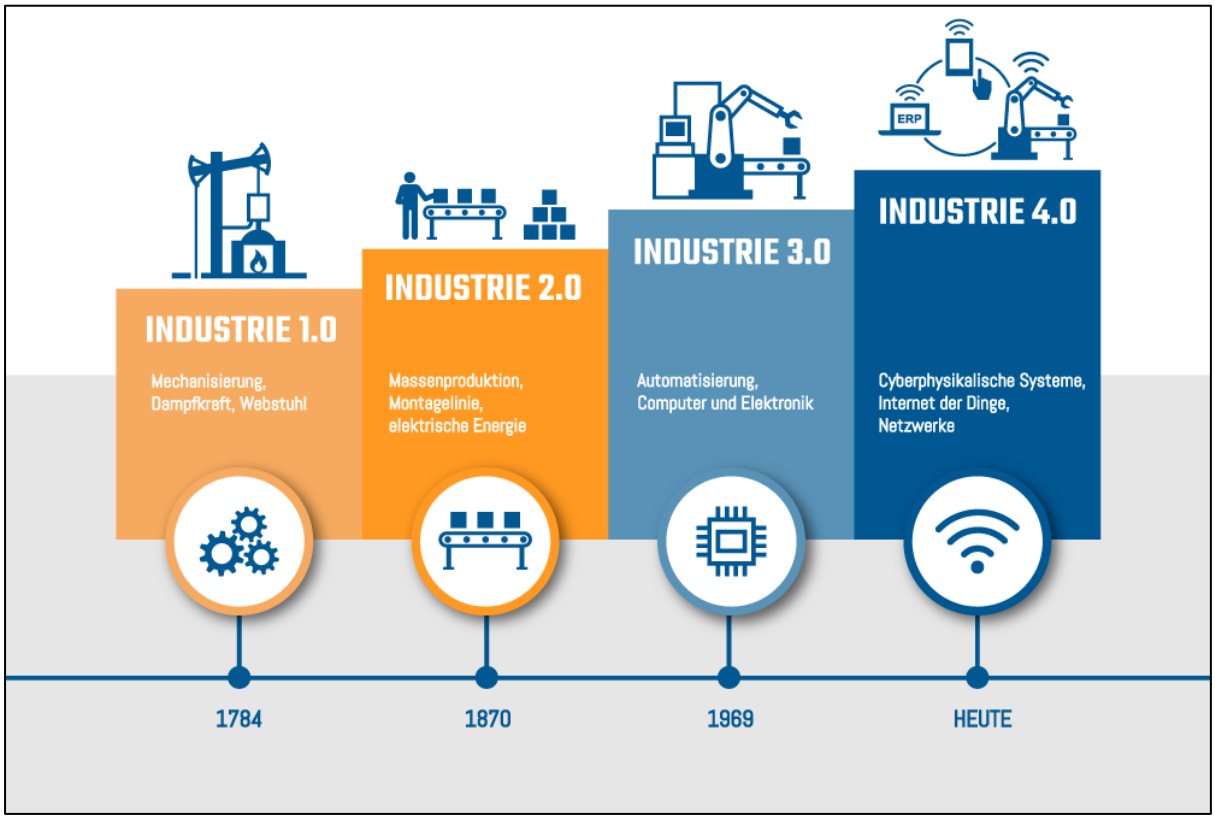


Abbildung 2: Historische Entwicklung Industrie 4.0 [7]

Die Entwicklung von Industrie 4.0 ist in den Kontext vorheriger industrieller Revolutionen einzuordnen. Die erste industrielle Revolution im 18. Jahrhundert war durch die Mechanisierung mit Hilfe von Wasser- und Dampfkraft geprägt. Mit der zweiten industriellen Revolution kam Ende des 19. Jahrhunderts die Massenproduktion unter Nutzung elektrischer Energie hinzu. Die dritte industrielle Revolution begann in den 1970er-Jahren mit dem Einsatz von Elektronik und IT zur Automatisierung von Produktionsprozessen – insbesondere durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und industrielle Robotik. [7] [8]

Industrie 4.0 knüpft an diese Entwicklungen an, hebt sie jedoch auf eine neue Ebene. Zentrale Merkmale sind die umfassende Vernetzung von Maschinen und Systemen über das Internet der Dinge (IoT), die Echtzeitfähigkeit digitaler Prozesse sowie die Dezentralisierung von Entscheidungsprozessen [9]. Während frühere Industriephasen stark zentralisiert und linear organisiert waren, erlaubt Industrie 4.0 eine hochflexible und adaptive Fertigung. Dabei werden Cyber-Physische Systeme (CPS) – also Systeme, in denen mechanische Komponenten mit Software und Kommunikationstechnologien integriert sind – zum Fundament zukünftiger Produktionsstrukturen. [6] [7]

Heute sind viele Elemente von Industrie 4.0 bereits in der Praxis angekommen, allerdings variiert die Umsetzung je nach Branche, Unternehmensgröße und Region. Große Industrieunternehmen investieren gezielt in die Modernisierung ihrer Produktionsanlagen, insbesondere in Bereichen wie Predictive Maintenance, Echtzeitdatenverarbeitung, vernetzte Sensorik und Cloud-basierte Steuerungssysteme. Diese Technologien ermöglichen eine effizientere und flexiblere Produktion. Kleinere Unternehmen hingegen stehen häufig vor Herausforderungen wie hohen Investitionskosten, dem Fehlen von IT-Kompetenzen und fehlenden Standardlösungen. [9]

Ein zentrales Element der Industrie 4.0 ist die horizontale und vertikale Integration. Die horizontale Integration bezeichnet die durchgängige digitale Vernetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette – vom Lieferanten bis zum Kunden. Sie ermöglicht eine optimierte Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den verschiedenen Akteuren der Wertschöpfungskette. Die vertikale Integration meint die Vernetzung innerhalb eines Unternehmens, vom Sensor über die Maschinensteuerung bis zur Unternehmensleitebene (ERP). Diese Vernetzung ermöglicht eine durchgehende Datennutzung und eine effiziente Steuerung der Produktion in Echtzeit. Zudem unterstützt sie die Einführung neuer

Geschäftsmodelle wie „Pay-per-Use“, „Mass Customization“ oder „Data-as-a-Service“. [5] [7] [9]

Zudem spielen neue Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI), 5G-Kommunikation, digitale Zwillinge und Blockchain eine zunehmend wichtige Rolle. Durch KI-gestützte Algorithmen lassen sich komplexe Zusammenhänge in der Produktion analysieren und Optimierungspotenziale erschließen. Digitale Zwillinge ermöglichen es, reale Maschinen virtuell abzubilden und deren Verhalten zu simulieren oder vorherzusagen. Auch Themen wie Cybersicherheit, Datenhoheit und Interoperabilität gewinnen im Kontext von Industrie 4.0 an Bedeutung, da sie die Grundlage für eine zuverlässige und vertrauenswürdige Digitalisierung industrieller Prozesse darstellen [1] [10].

Trotz technologischer Fortschritte zeigt sich in vielen Studien, dass die organisatorische und kulturelle Transformation eine ebenso große Herausforderung darstellt wie die technische. Industrie 4.0 verlangt nicht nur neue Technologien, sondern auch neue Denk- und Arbeitsweisen – etwa agile Methoden, interdisziplinäre Zusammenarbeit und eine neue Rolle des Mitarbeiters als digitaler Entscheider und Prozessbegleiter [5] [9].

Die Entwicklung von Industrie 4.0 ist keineswegs abgeschlossen. Vielmehr handelt es sich um einen dynamischen Wandel, der durch technologische Innovationen, geopolitische Veränderungen und ökologische Herausforderungen kontinuierlich vorangetrieben wird. Zukünftige Produktionssysteme werden nicht nur intelligenter und vernetzter, sondern auch nachhaltiger, resilienter und anpassungsfähiger werden müssen [1] [9].

Ein Trend, der sich bereits abzeichnet, ist der Übergang zu Industrie 5.0, bei dem der Mensch wieder stärker in den Mittelpunkt rückt. Während Industrie 4.0 die Autonomie und Effizienz der Systeme fokussiert, betont Industrie 5.0 die Kooperation zwischen Mensch und Maschine, etwa durch kollaborative Robotik, KI-Assistenzsysteme und ergonomisch optimierte Arbeitsplätze. Ziel ist eine sozial und ökologisch verträgliche Produktion, die wirtschaftliche Effizienz mit Nachhaltigkeit und Mitarbeiterzufriedenheit verbindet [11].

Auch geopolitische Entwicklungen – wie Lieferkettenprobleme, internationale Standards oder der Schutz kritischer Infrastrukturen – werden Industrie 4.0 prägen. In Europa wird vermehrt auf Datensouveränität, Interoperabilität und offene Plattformen gesetzt, etwa durch Initiativen wie GAIA-X oder das Industrial Digital Twin Association-Modell. Zudem wird die

Rolle der künstlichen Intelligenz weiterwachsen, nicht nur in der Produktion, sondern auch in der Instandhaltung, Qualitätssicherung und strategischen Entscheidungsfindung [5].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Industrie 4.0 als strategische Initiative weit über die rein technische Ebene hinausgeht. Sie steht für eine tiefgreifende Transformation industrieller Wertschöpfung, die neue Formen der Organisation, Führung und Zusammenarbeit erfordert. Unternehmen, die diesen Wandel aktiv gestalten, können nicht nur ihre Wettbewerbsfähigkeit sichern, sondern auch neue Geschäftsmodelle und Märkte erschließen. Industrie 4.0 ist damit nicht nur ein technologischer Fortschritt, sondern ein umfassender Paradigmenwechsel in der industriellen Produktion [1]

2.2 Die Automatisierungspyramide

Mit der Einführung von Industrie 4.0 verändert sich auch das traditionelle Modell der Automatisierungspyramide. In der klassischen Version der Pyramide sind die Ebenen streng hierarchisch und folgen einer festen Struktur, in der Daten von der Feldebene über die Steuerungsebene bis hin zur Unternehmensebene aufsteigen. Doch Industrie 4.0 sorgt für eine grundlegende Umgestaltung dieser Struktur: Maschinen und Anlagen kommunizieren autonom und in Echtzeit miteinander, wodurch die Grenzen der klassischen Pyramide zunehmend verschwimmen. Technologien wie das Internet der Dinge (IoT), Cloud Computing und Künstliche Intelligenz (KI) ermöglichen es, dass Produktionsprozesse selbstständig und dezentral optimiert werden, ohne dass jede Entscheidung eine zentrale Steuerung erfordert. [12]

In einer Industrie 4.0-Umgebung kann die Automatisierungspyramide nicht mehr als starre Hierarchie betrachtet werden. Vielmehr handelt es sich um ein dynamisches, vernetztes System, in dem Maschinen, Sensoren und Aktoren miteinander kommunizieren und Prozesse autonom anpassen. Die Datenflüsse zwischen den verschiedenen Ebenen der Pyramide sind flexibler und dezentraler, was eine größere Agilität und eine schnellere Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen im Produktionsprozess ermöglicht. [12] [13]

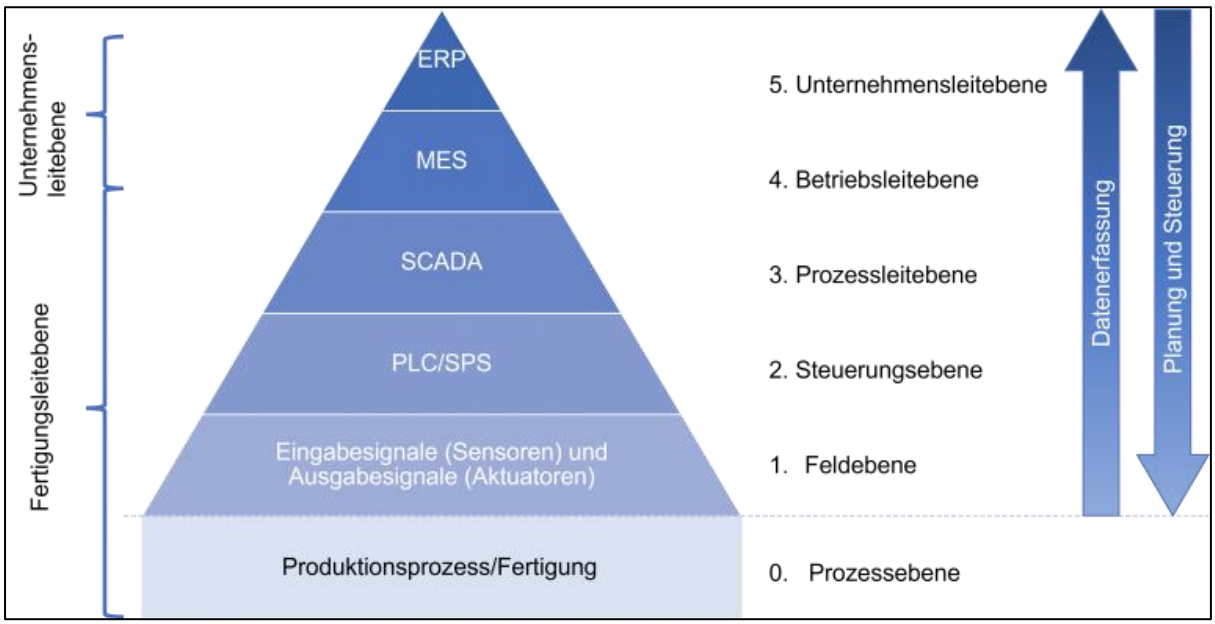


Abbildung 3: Automatisierungspyramide [12]

Trotz dieser Veränderungen bleibt das grundlegende Modell der Automatisierungspyramide in vielen Industrien weiterhin ein nützliches Werkzeug, um die verschiedenen Hierarchieebenen in der Produktion zu strukturieren.

Traditionell wird die Pyramide in sechs Hauptschichten unterteilt, die jeweils eine andere Funktion und ein anderes Ziel verfolgen:

Die Prozessebene (Ebene 0) bildet die Grundlage und umfasst den eigentlichen Produktionsprozess, bei dem physikalische Vorgänge wie Bohren, Schweißen oder Fördern stattfinden. Es handelt sich um eine rein operative Ebene, auf der keine Daten verarbeitet werden, sondern mechanische, thermische oder elektrische Prozesse ablaufen. Diese Ebene stellt die reale Welt dar, in die durch Sensoren und Aktoren eingegriffen wird. [12]

Darüber liegt die Feldebene (Ebene 1), die für die Erfassung und Beeinflussung dieser Prozesse zuständig ist. Sensoren sammeln Informationen wie Temperatur, Druck oder Position, während Aktoren – etwa Motoren, Ventile oder Zylinder – Steuerbefehle ausführen. Die Signale dieser Geräte werden an die nächste Steuerungsebene weitergegeben. Somit bildet die Feldebene die Schnittstelle zwischen dem physischen Prozess und der digitalen Steuerung. [13]

Die Steuerungsebene (Ebene 2) wird durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS/PLC) gebildet. Diese verarbeiten die Eingangssignale der Sensoren und erzeugen daraus Steuerbefehle für die Aktoren. Die Programme auf dieser Ebene definieren das logische Verhalten der Anlage und sorgen dafür, dass alle Prozesse koordiniert und sicher ablaufen. Sie arbeitet in Echtzeit und ist zentral für die Funktion automatisierter Systeme. [13]

Auf der Prozessleitebene (Ebene 3) kommen SCADA-Systeme (Supervisory Control and Data Acquisition) zum Einsatz. Diese Systeme visualisieren und überwachen die Produktionsprozesse, wobei das Bedienpersonal in der Lage ist, in das System einzugreifen. Prozessdaten werden gesammelt, gespeichert und grafisch dargestellt, um Transparenz zu

schaffen. Die Prozessleitebene ermöglicht damit eine übergeordnete Kontrolle über mehrere Steuerungssysteme hinweg. [13] [14]

Die Betriebsebene (Ebene 4) wird durch MES-Systeme (Manufacturing Execution Systems) repräsentiert. Sie stellt die Verbindung zwischen der technischen Produktion und der betriebswirtschaftlichen Planung dar. MES-Systeme übernehmen Aufgaben wie die Feinplanung der Produktion, das Monitoring von Effizienzkennzahlen, die Rückverfolgung von Produkten und das Wartungsmanagement. Dadurch wird eine flexible und transparente Steuerung der Fertigung in Echtzeit möglich. [13] [15]

An der Spitze der Pyramide befindet sich die Unternehmensleitebene (Ebene 5) mit ERP-Systemen (Enterprise Resource Planning). Diese Systeme erfassen, planen und steuern sämtliche Unternehmensressourcen – wie Material, Personal oder Kapital – auf strategischer Ebene. Sie verarbeiten aggregierte Produktionsdaten aus den unteren Ebenen und dienen der langfristigen Optimierung von Geschäftsprozessen. Die ERP-Ebene bildet somit die Verbindung zur Unternehmensführung und den wirtschaftlichen Zielsetzungen. [13] [14]

2.3 Sensorik und Aktorik in der modernen Produktion

Sensoren und Aktoren bilden das zentrale Bindeglied zwischen der physischen und der digitalen Welt in modernen Produktionssystemen. Dies wird anschaulich durch das abgebildete Wirkprinzip verdeutlicht (Abb. 4): Sensoren erfassen Daten aus der physischen Ebene, bereiten sie auf und überführen sie in die digitale Ebene, wo die Informationen verarbeitet und analysiert werden. Auf Basis dieser Daten erfolgt über Aktoren eine gezielte Reaktion, die wiederum physische Prozesse beeinflusst – ein kontinuierlicher Kreislauf aus Wahrnehmung und Handlung. [16]

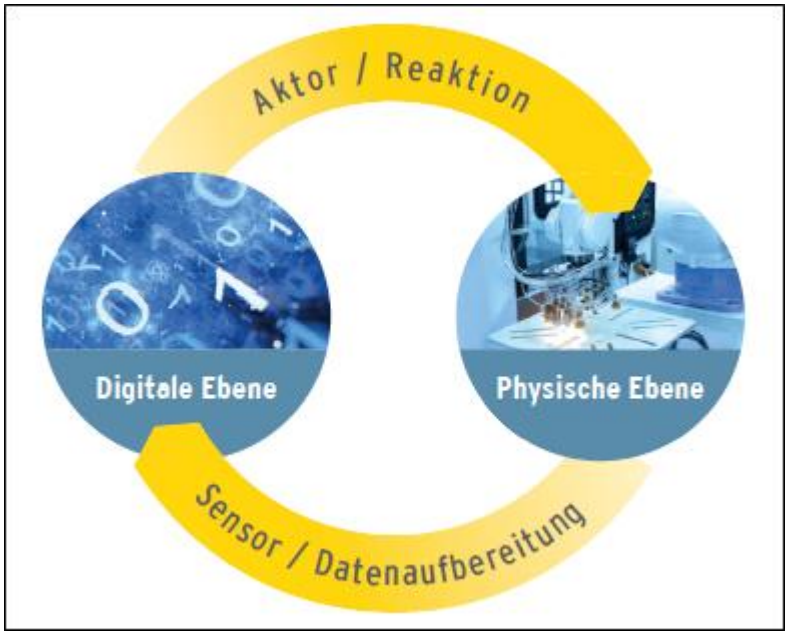


Abbildung 4: Sensorik und Aktorik [16]

In der Praxis werden unterschiedliche Sensortypen in Produktionssystemen eingesetzt, die jeweils spezialisierte Aufgaben übernehmen [17]. Ein verbreiteter Sensortyp ist der induktive Sensor, der insbesondere in rauen Industrieumgebungen wie der Fertigung oder Montage von Maschinen zum Einsatz kommt. Diese Sensoren arbeiten berührungslos und erkennen metallische Objekte durch die Veränderung eines elektromagnetischen Feldes. Sie zeichnen sich durch ihre Robustheit gegenüber Staub, Feuchtigkeit und Öl aus, was sie ideal für Positionserfassungen und als Näherungsschalter in automatisierten Anlagen macht. [18]

Neben den induktiven Sensoren finden auch optische Sensoren in der Industrie breite Anwendung. Diese Sensoren nutzen Licht, um Objekte zu detektieren und sind besonders vorteilhaft für hochpräzise Anwendungen. Sie unterscheiden sich in ihrer Bauart, z.B. als Einweg-Lichtschranken, Reflexionslichtschranken oder Gabellichtschranken, je nach Art der Erkennung. Optische Sensoren kommen häufig als Endschalter zum Einsatz, etwa zur Überwachung von Werkstücken auf Förderbändern oder zur Auslösung von Arbeitsschritten in der Fertigung. Sie bieten eine hohe Schaltfrequenz und eine präzise Erfassungsleistung. [19] [18]

Ein weiterer fortschrittlicher Bereich der Sensorik ist die industrielle Bildverarbeitung, bei der intelligente Kamerasysteme zur Objekterkennung und Qualitätskontrolle eingesetzt werden. Diese Kameras nutzen fortschrittliche Algorithmen zur Mustererkennung, Kantendetektion und Farbanalyse. Sie ermöglichen eine detaillierte Erkennung von Werkstücken und deren Eigenschaften, was besonders in flexiblen und sich schnell verändernden Produktionsumgebungen von Vorteil ist. Unterstützt durch lernfähige Software können diese Systeme sogar unvollständige oder variierende Merkmale zuverlässig erkennen, was ihre Anwendbarkeit in der Qualitätssicherung und der automatischen Identifikation verbessert. [17].

Aktoren sind die Mechanismen, die die umgekehrte Richtung des Informationsflusses übernehmen, indem sie physische Reaktionen auf die durch Sensoren erfassten Daten auslösen. Ein häufig genutzter Aktor ist der Elektromotor, der eine Vielzahl mechanischer Bewegungen in der Fertigung ermöglicht. Elektromotoren werden oft mit Frequenzumrichtern kombiniert, die eine dynamische Anpassung der Geschwindigkeit und des Drehmoments erlauben. Dies sorgt für eine flexible Steuerung von Förderbändern, Maschinen und anderen mechanischen Systemen, was eine Anpassung an unterschiedliche Produktionsanforderungen ermöglicht . [19] [20]
Neben Elektromotoren werden auch pneumatische Aktoren verwendet, insbesondere wenn es um die schnelle und präzise Handhabung von Werkstücken geht. Diese Aktoren nutzen Druckluft, um Bewegungen zu erzeugen, und kommen häufig in Anwendungen zur Werkstückumlagerung oder -trennung zum Einsatz. Pneumatische Systeme sind einfach aufgebaut, robust und zeichnen sich durch hohe Schaltgeschwindigkeit aus. Sie sind ideal für

Aufgaben, bei denen schnelle und wiederholgenaue Bewegungen bei geringer Last erforderlich sind [17].

Ein weiteres Beispiel für fortschrittliche Aktorik sind Roboterarme, die eine Schlüsseltechnologie in der modernen Fertigung darstellen. Roboterarme bestehen aus mehreren rotatorischen und linearen Achsen, die es ihnen ermöglichen, sich flexibel im dreidimensionalen Raum zu bewegen. Diese Roboter können, unterstützt durch Sensoren und Bildverarbeitung, eine Vielzahl von Aufgaben autonom übernehmen, wie das Greifen, Positionieren und Bearbeiten von Werkstücken. Die Integration von Sensorik und die Steuerung über SPS- oder Industrie-PC-basierte Systeme ermöglichen eine hohe Flexibilität und Präzision, was insbesondere in hochautomatisierten Produktionsprozessen von Bedeutung ist. [21]

Die Kombination von Sensoren und Aktoren in modernen Produktionssystemen stellt eine zentrale Voraussetzung für die Realisierung von Industrie 4.0 dar. Diese Technologien ermöglichen nicht nur eine präzise Steuerung und Überwachung von Fertigungsprozessen, sondern auch eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Produktionsanforderungen. Durch den kontinuierlichen Informationsaustausch zwischen den Sensoren, Aktoren und den übergeordneten Steuerungssystemen wird ein effizienter, fehlerfreier und ressourcenschonender Produktionsprozess gewährleistet. [17] [22]

Im Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) werden verschiedene dieser Technologien exemplarisch eingesetzt. Optische und induktive Sensoren dienen als zuverlässige Erfassungselemente für Positionen und Zustände. Bildverarbeitungskameras und QR-Code-Scanner übernehmen Aufgaben der Identifikation und Qualitätsprüfung. Die Aktorik umfasst Roboterarme zur Handhabung, Elektromotoren für Fördertechnik sowie pneumatische Umleger zur werkstückspezifischen Anpassung des Materialflusses. Diese Kombination ermöglicht nicht nur eine effiziente und flexible Fertigung, sondern auch die praxisnahe Erforschung und Weiterentwicklung moderner Automatisierungslösungen.

2.4 Funktionsweise und Aufbau speicherprogrammierbarer Steuerungen

Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist das zentrale Element der Automatisierungstechnik in industriellen Anlagen. Ihre Hauptfunktion besteht darin, Prozesse und Maschinen in der Fertigung und Produktion zu steuern, indem sie Eingaben verarbeitet, Entscheidungen trifft und Steuerbefehle an Ausgabegeräte weitergibt. [23] [24]

In diesem Zusammenhang ist der Aufbau einer SPS ebenso wichtig wie ihre Funktionsweise, da er den Rahmen für ihre Zuverlässigkeit, Flexibilität und die Ausführung komplexer Steuerungsaufgaben bildet. Der Aufbau einer SPS ist klar strukturiert und umfasst verschiedene Komponenten, die miteinander interagieren, um die Steuerung effizient und fehlerfrei durchzuführen. Die wichtigsten Aspekte dieses Aufbaus sowie die Funktionsweise der SPS werden im Folgenden detailliert erläutert.

2.4.1. Hardwareaufbau einer SPS

Der Hardwareaufbau einer SPS kann grob in drei Hauptkomponenten unterteilt werden: die Zentraleinheit (CPU), die Eingangs- und Ausgangsmodule (I/O-Module) sowie die Kommunikationsmodule. Jede dieser Komponenten hat ihre eigene spezifische Funktion und trägt zur Gesamtleistung der SPS bei.

Die Zentraleinheit (CPU) ist das "Gehirn" der SPS. Sie verarbeitet die Eingangsdaten, führt die Logik des Programms aus und sendet die berechneten Steuerbefehle an die Ausgangsmodule. Die CPU kommuniziert dabei mit den I/O-Modulen, um physikalische Signale zu empfangen und auszugeben. Sie übernimmt die Steuerung und Verarbeitung von Eingaben, berechnet die nötigen Schritte gemäß dem Steuerungsprogramm und gibt entsprechende Befehle weiter. In modernen SPS-Systemen ist die CPU in der Regel leistungsstark und in der Lage, mehrere Aufgaben gleichzeitig zu bewältigen, was die Reaktionsgeschwindigkeit der Steuerung erheblich erhöht. [25]

Die Eingangs- und Ausgangsmodule (I/O-Module) sind ebenfalls von zentraler Bedeutung. Sie sind dafür zuständig, die physikalischen Signale zu erfassen und in digitale Daten umzuwandeln, die die SPS verarbeiten kann. Dies kann beispielsweise das Erfassen von Signalen von Sensoren oder Schaltern umfassen, die dann als Eingangsdaten in die SPS eingegeben werden. Auf der anderen Seite übernehmen die I/O-Module die Aufgabe, die Steuerbefehle der CPU an Aktoren, wie Motoren, Ventile oder Pumpen, weiterzugeben, um die gewünschten Prozesse auszulösen.

Ein weiteres wichtiges Element der SPS sind die Kommunikationsmodule, die es der SPS ermöglichen, mit anderen Steuerungseinheiten oder Systemen zu kommunizieren. Diese Module stellen sicher, dass die SPS in ein größeres Netzwerk eingebunden werden kann, beispielsweise über Feldbusse oder Ethernet-basierte Netzwerke. Dies ist besonders wichtig, wenn mehrere SPS-Systeme miteinander kommunizieren müssen, um einen übergeordneten Prozess zu steuern. Die Kommunikation ermöglicht es, dass die SPS mit anderen Maschinen oder Geräten verknüpft wird, um Daten auszutauschen und so die Steuerung und Automatisierung von Produktionsprozessen zu optimieren. [25]

2.4.2. Steuerung und Verarbeitung von Daten

Die SPS verarbeitet ihre Eingangsdaten auf Basis von Programmen, die im Vorfeld festgelegt werden. Diese Programme bestimmen die gesamte Logik, nach der die SPS agiert. Es gibt eine Vielzahl von Programmiersprachen, die in der SPS-Programmierung verwendet werden, von denen die gängigsten in der IEC 61131-3 festgelegt sind. Zu diesen Sprachen gehören KOP (Kontaktplan), FUP (Funktionsplan), AWL (Anweisungsliste), SCL (Structured Control Language) und ST (Structured Text). Jede dieser Sprachen hat ihre eigenen Anwendungsbereiche und wird je nach Komplexität und Anforderungen der Steuerungsaufgabe gewählt. [26]

Die Verarbeitungsphase in der SPS erfolgt auf Grundlage dieser Programme, die in der CPU gespeichert sind. Sobald die Eingangsdaten durch die I/O-Module erfasst werden, beginnt die CPU mit der Verarbeitung der Daten. Hierbei können unter anderem mathematische Berechnungen durchgeführt, Entscheidungsprozesse getroffen oder Logikfunktionen ausgeführt werden. Ein wichtiger Aspekt dieser Verarbeitungsphase ist die Zykluszeit, die beschreibt, wie schnell die SPS auf Änderungen der Eingangsdaten reagieren kann. Die Zykluszeit hängt von der Leistungsfähigkeit der CPU und der Komplexität des Programms ab. Je kürzer die Zykluszeit, desto schneller reagiert das System auf Änderungen und Steuerbefehle. [25]

2.4.3. Programmablauf und Zykluszeit

Der Programmablauf einer SPS (Speicherprogrammierbaren Steuerung) besteht aus mehreren Phasen, die zyklisch und kontinuierlich wiederholt werden. Die grundlegenden Schritte sind die Eingabe, die Verarbeitung und die Ausgabe der Daten.
In der Eingabephase werden die physikalischen Signale von Sensoren und anderen Eingabegeräten erfasst. Diese analogen oder digitalen Signale werden durch die Eingangsbaugruppen der SPS in verarbeitbare digitale Werte umgewandelt und an die CPU übermittelt.

Die Verarbeitung erfolgt dann auf Basis des im Anwenderprogramm definierten Steuerungsablaufs. In der Abbildung ist dieser Ablauf durch den Organisationsbaustein (OB) dargestellt, welcher die oberste Instanz des SPS-Programms bildet. Der OB ruft nacheinander verschiedene Funktionsbausteine (FB) und Funktionen (FC) auf.
Ein Funktionsbaustein (FB) besitzt eine eigene Instanzdatenbaustein (iDB), in dem seine internen Zustände und Variablen gespeichert werden. Dadurch kann er zustandsbehaftete Operationen ausführen, wie z. B. Zähler oder Timer.
Eine Funktion (FC) hingegen ist zustandslos und verarbeitet Eingabewerte, gibt Ausgabewerte zurück, ohne sich selbst zu merken, was vorher passiert ist. FCs eignen sich besonders für Berechnungen und logische Operationen.

Sowohl FBs als auch FCs können auf globale Datenbausteine (Global DB) zugreifen, in denen allgemein verfügbare Daten und Prozessinformationen gespeichert sind. [27]

Nach der Abarbeitung des Anwenderprogramms erfolgt die Ausgabephase, in der die berechneten Steuerbefehle an die Ausgabebaugruppen übergeben werden, um Aktoren wie Motoren, Ventile oder Lampen anzusteuern.

Ein wichtiger Aspekt des Programmbetriebs ist die Zykluszeit, also der Zeitraum, den die SPS benötigt, um einen vollständigen Zyklus – von der Erfassung der Eingangsdaten über die Programmausführung bis zur Ausgabe – zu durchlaufen. Die Zykluszeit ist entscheidend für die Reaktionsgeschwindigkeit der Steuerung. In zeitkritischen Anwendungen ist eine möglichst kurze und stabile Zykluszeit erforderlich, um schnell auf Prozessänderungen reagieren zu können. [25]

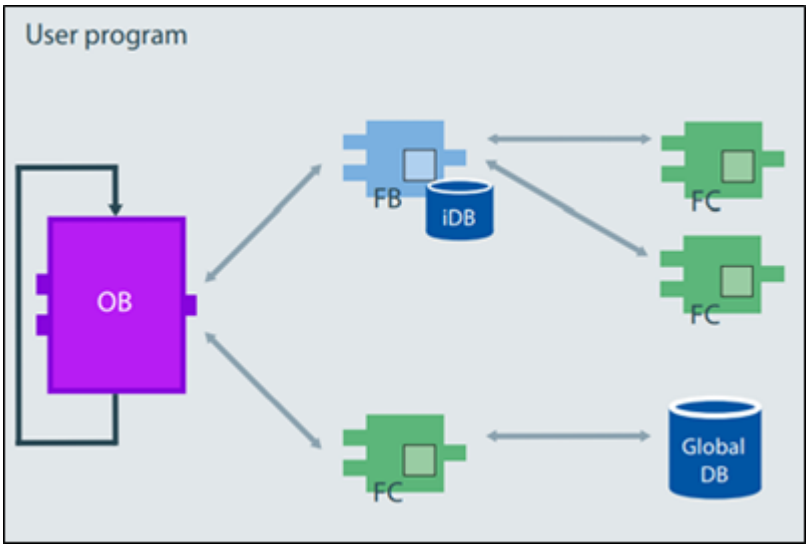


Abbildung 5: Programmablauf und Zykluszeit [27]

Die dargestellte Abbildung veranschaulicht den modularen Aufbau des SPS-Programms, in dem der OB die Struktur vorgibt und über FBs und FCs verschiedene logische oder technische Teilaufgaben ausgeführt werden. Die Trennung von Zustandsbehaftung (FB/iDB) und zustandsloser Funktionalität (FC) sowie der strukturierte Zugriff auf Datenbausteine ermöglicht eine klare, wartbare und wiederverwendbare Programmierung.

2.4.4. Das EVA-Prinzip am Beispiel SPS

Das EVA-Prinzip (Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe) bildet das Fundament der SPS-Steuerung und beschreibt den Ablauf, wie Daten durch die SPS verarbeitet werden. Das Prinzip lässt sich in drei Hauptphasen unterteilen: Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe. In der ersten Phase, der Eingabe, werden Signale von verschiedenen Eingabegeräten wie Sensoren erfasst. Diese Signale können unterschiedliche physikalische Größen darstellen, wie beispielsweise Temperaturen, Druckwerte oder Positionsdaten. Diese Eingangsdaten werden in digitale Form umgewandelt und der SPS zur weiteren Verarbeitung übergeben.

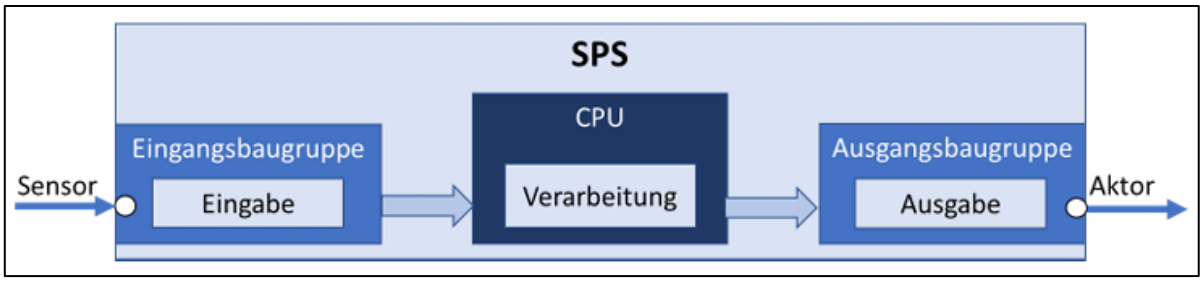


Abbildung 6: Das EVA-Prinzip am Beispiel SPS

In der Verarbeitungsphase führt die SPS dann die Logik des Programms aus, wobei sie die Eingangsdaten analysiert, und nach den festgelegten Regeln entscheidet, welche Steuerbefehle an die Ausgangsmodule gesendet werden müssen. Schließlich erfolgt die Ausgabe, bei der die berechneten Steuerbefehle an die entsprechenden Ausgabemodule übertragen werden. Diese können beispielsweise Motoren, Pumpen oder Ventile steuern, die in der industriellen Anwendung eine wesentliche Rolle spielen.

Das EVA-Prinzip sorgt für einen klar strukturierten Ablauf der Informationsverarbeitung in der SPS, was wiederum eine hohe Effizienz und Nachvollziehbarkeit bei der Steuerung von Prozessen ermöglicht. Es stellt sicher, dass die SPS kontinuierlich auf Änderungen in den Eingabewerten reagiert und die entsprechenden Steuerbefehle ausgibt, um die gewünschten Prozesse aufrechtzuerhalten. [25]

2.4.5. Kommunikation und Vernetzung von SPS-Systemen

Moderne SPS-Systeme sind nicht mehr isoliert, sondern zunehmend miteinander vernetzt, um in komplexen Produktionsumgebungen effektiv zusammenzuarbeiten. Die Kommunikation zwischen verschiedenen SPS-Systemen erfolgt über Kommunikationsschnittstellen wie Feldbusse oder Ethernet-basierte Netzwerke. Diese Schnittstellen ermöglichen den Datenaustausch zwischen den verschiedenen Steuerungen, was in modernen industriellen Prozessen von entscheidender Bedeutung ist, um eine effiziente Zusammenarbeit der Maschinen und Systeme zu gewährleisten.

Die Vernetzung von SPS-Systemen ermöglicht es, dass mehrere Geräte und Maschinen miteinander kommunizieren und Entscheidungen miteinander koordinieren. Diese Integration bildet die Grundlage für die Umsetzung von Industrie 4.0, bei der Maschinen autonom miteinander interagieren und sich gegenseitig steuern können, um die Effizienz und Flexibilität der Produktion zu erhöhen. In einem solchen Szenario ist eine schnelle und zuverlässige Kommunikation zwischen den SPS-Systemen erforderlich, um eine nahtlose und effektive Steuerung des gesamten Produktionsprozesses sicherzustellen. [3] [25]

2.5 Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen in der industriellen Automatisierung

Die Wahl der richtigen Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen ist eine der entscheidenden Herausforderungen in der modernen Automatisierungstechnik, insbesondere im Kontext von Industrie 4.0. In einer zunehmend vernetzten Produktionsumgebung ist es unerlässlich, dass verschiedene Systeme – von Sensoren und Aktoren bis hin zu Steuerungen und IT-Systemen – nahtlos miteinander kommunizieren können. Diese Kommunikation muss schnell, zuverlässig und sicher erfolgen, um eine effiziente Steuerung und Überwachung der Produktionsprozesse zu gewährleisten. Eine optimale Wahl der Kommunikationsprotokolle sorgt dafür, dass alle Systeme effizient zusammenarbeiten und die Produktionsabläufe reibungslos ablaufen können.

Traditionell dominierte in der Automatisierungstechnik eine Reihe serieller Kommunikationsprotokolle, von denen Modbus RTU und Profibus die bekanntesten Vertreter sind. Diese Protokolle basieren auf RS-232 bzw. RS-485 und wurden insbesondere in den ersten Jahren der industriellen Automatisierung weit verbreitet. Modbus RTU, ein einfaches und robustes Protokoll, ermöglichte eine zuverlässige Kommunikation über kurze bis mittlere Distanzen. Profibus, als eines der ältesten Protokolle für die Prozessautomatisierung, war besonders für die Kommunikation zwischen Automatisierungsgeräten geeignet und ermöglichte die Übertragung von Daten über größere Entfernungen. Diese klassischen Protokolle waren aufgrund ihrer einfachen Implementierung und ihrer Robustheit in isolierten, nicht vernetzten Umgebungen ideal. Allerdings stießen sie mit der zunehmenden Vernetzung und den steigenden Anforderungen an Geschwindigkeit, Flexibilität und Integration in IT-Systeme schnell an ihre Grenzen. [28]

Mit der Entwicklung der Ethernet-basierten Kommunikation hat sich das PROFINET-Protokoll als einer der Standardkommunikationswege in der modernen industriellen Automatisierung etabliert. PROFINET bietet hohe Übertragungsgeschwindigkeiten und ermöglicht eine

Echtzeitkommunikation, die für die Steuerung komplexer Maschinen und Roboter erforderlich ist. Ein zentrales Merkmal von PROFINET ist seine Fähigkeit, nahtlos mit IT-Systemen zu kommunizieren, was eine flexible Vernetzung von Produktions- und IT-Systemen ermöglicht. Dies ist besonders wichtig für Industrie 4.0, da hier die nahtlose Integration von Maschinen und IT-Elementen gefordert wird. In Deutschland ist PROFINET aufgrund der starken Präsenz von Siemens, einem der führenden Anbieter von Automatisierungslösungen, besonders weit verbreitet und dominiert vielerorts den Markt. Die Integration von Siemens-Steuerungen in industrielle Netzwerke erfolgt häufig über PROFINET, was das Protokoll zu einem der wichtigsten in der deutschen Automatisierungslandschaft macht. [29]

Ein weiteres fortschrittliches Protokoll ist EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology). EtherCAT basiert auf Standard-Ethernet, nutzt jedoch eine „on-the-fly“-Datenverarbeitung, bei der Daten bereits während der Weiterleitung in den Geräten bearbeitet werden. Diese Technik ermöglicht niedrige Zykluszeiten, was EtherCAT besonders für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Geschwindigkeit und Synchronität, wie beispielsweise in der Robotik oder bei der Steuerung von Maschinen mit vielen Achsen, geeignet macht. EtherCAT hat sich als sehr geeignet für zeitkritische Anwendungen in der industriellen Automatisierung etabliert, in denen schnelle Reaktionszeiten und minimale Latenzen erforderlich sind. Allerdings ist EtherCAT auf dem deutschen Markt aufgrund der Dominanz von Siemens und PROFINET weniger verbreitet, wird jedoch zunehmend in spezialisierten Anwendungsbereichen genutzt, in denen Echtzeitkommunikation von entscheidender Bedeutung ist. [29] [30]

Die Rolle von OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) ist ebenfalls nicht zu unterschätzen. Als plattformunabhängiges Kommunikationsprotokoll ermöglicht OPC UA eine sichere und zuverlässige Kommunikation zwischen unterschiedlichsten Systemen und Geräten. Es ist insbesondere in der vertikalen und horizontalen Integration von Maschinen und IT-Systemen innerhalb von Industrie 4.0 von Bedeutung. OPC UA sorgt für eine effiziente Integration von Maschinensteuerungen und übergeordneten Systemen wie ERP oder MES und ist somit ein zentrales Element für die digitale Vernetzung in der Industrie [31].

Zusätzlich gewinnen webbasierte Kommunikationsprotokolle wie MQTT und RESTful APIs immer mehr an Bedeutung, vor allem in IoT-Anwendungen und für die Vernetzung von Geräten über das Internet. MQTT ist ein leichtgewichtiges Publish/Subscribe-Protokoll, das für Umgebungen mit geringer Bandbreite und die Fernüberwachung von Anlagen besonders gut geeignet ist. Es ermöglicht die effiziente Übertragung von Zustandsdaten in Echtzeit und wird häufig in Smart-Factory-Anwendungen verwendet, bei denen große Mengen an Daten verarbeitet werden müssen [32].

Ein weiteres vielversprechendes Konzept ist Time-Sensitive Networking (TSN), das Ethernet-basierte Netzwerke für Echtzeitanwendungen optimiert. TSN ermöglicht eine präzise Zeitsteuerung und garantiert eine niedrige Latenz für Echtzeitdatenübertragung, was es zu einer Schlüsseltechnologie für die nächste Stufe der industriellen Vernetzung in Industrie 4.0 macht [33].

Die Auswahl und Integration der richtigen Kommunikationsprotokolle ist daher von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0. Die fortlaufende Weiterentwicklung und Integration neuer Standards ermöglichen eine nahtlose Verbindung zwischen IT- und OT-Systemen und bilden so die Grundlage für eine leistungsfähige und zukunftsfähige industrielle Automatisierung [28] [33].

2.6 Manufacturing Execution System (MES)

Das Manufacturing Execution System (MES) stellt eine zentrale Schicht innerhalb der industriellen IT-Landschaft dar und nimmt in der Automatisierungspyramide die Vermittlerrolle zwischen der operativen Steuerungsebene (z. B. SPS, SCADA) und der betriebswirtschaftlichen Planungsebene (ERP-Systeme) ein (vgl. Kapitel 2.2). Es sorgt für eine durchgängige Informationsverarbeitung, die eine effektive und transparente Steuerung der Produktion in Echtzeit ermöglicht. Dabei steht das MES in direkter Verbindung mit Maschinen, Anlagen und Mitarbeitern in der Produktion und sammelt kontinuierlich Daten aus dem Fertigungsprozess, um daraus steuerungsrelevante Informationen abzuleiten. [34] [35]

Die Aufgaben eines MES sind vielfältig und reichen von der detaillierten Feinplanung über das Auftragsmanagement und die Betriebsdatenerfassung bis hin zur Qualitätssicherung und Instandhaltungskoordination. Die zentrale Zielsetzung besteht darin, eine hohe Transparenz und Rückverfolgbarkeit sämtlicher Produktionsvorgänge zu schaffen und damit eine fundierte Grundlage für operative Entscheidungen zu liefern. MES-Systeme ermöglichen es, Störungen schneller zu erkennen, Abweichungen unmittelbar zu dokumentieren und durch gezielte Maßnahmen gegenzusteuern. Darüber hinaus stellt das MES sicher, dass die Produktionsabläufe stets im Einklang mit den übergeordneten Unternehmenszielen ablaufen. [35] [36]

Im Vergleich zu ERP-Systemen, die vor allem dispositive Funktionen wie Bestellwesen, Finanzbuchhaltung oder Personalmanagement erfüllen, agiert das MES deutlich näher an der Fertigung. Während das ERP plant, organisiert und langfristig steuert, stellt das MES sicher, dass die Pläne tatsächlich umgesetzt und laufend angepasst werden können – basierend auf aktuellen Zustandsinformationen aus der Produktion. Damit bildet das MES den operativen „Taktgeber“ der Produktion, der jederzeit auf veränderte Bedingungen reagieren kann.

Technologisch basiert ein MES auf einer modularen Softwarearchitektur, die je nach Anwendungsfall unterschiedliche Funktionalitäten umfasst. Dazu zählen u. a. Maschinen- und Betriebsdatenerfassung (MDE/BDE), Personaleinsatzplanung, Materialverfolgung

(Traceability), Qualitätsdatenerfassung sowie Reporting- und Analysefunktionen. Eine erfolgreiche Implementierung setzt voraus, dass diese Module nahtlos mit vorhandenen IT-Systemen kommunizieren. Standards wie ISA-95 und OPC UA ermöglichen dabei die strukturierte Integration in bestehende Systemlandschaften und definieren Modelle für Datenflüsse und funktionale Zuordnung. [35]

Durch den Einsatz eines MES können Unternehmen eine Vielzahl an Vorteilen realisieren. Dazu gehört etwa die Reduktion von Durchlaufzeiten, die Minimierung von Ausschuss und Nacharbeit, die Optimierung von Rüstzeiten sowie eine verbesserte Auslastung von Maschinen und Anlagen. Insbesondere die Verfügbarkeit aktueller, validierter Produktionsdaten bildet die Grundlage für kontinuierliche Verbesserungsprozesse und ermöglicht es, Abweichungen in Echtzeit zu analysieren und zu beheben. Auch aus regulatorischer Sicht ist ein MES von Bedeutung, da es hilft, die Dokumentationspflichten zuverlässig zu erfüllen.

Gleichzeitig bringt die Einführung eines MES, Herausforderungen mit sich. Neben dem technologischen Aufwand – etwa bei der Anbindung von Maschinen über industrielle Schnittstellen – sind auch organisatorische Veränderungen erforderlich. Mitarbeiter müssen in der Anwendung des Systems geschult werden, und bestehende Prozesse müssen teilweise neu strukturiert werden. Die Akzeptanz bei den Anwendern ist dabei ein entscheidender Erfolgsfaktor. Auch Investitionskosten und laufende Betriebskosten müssen berücksichtigt werden, wobei der langfristige Nutzen die Anfangshürden in vielen Fällen deutlich überwiegt.

Im Kontext von Industrie 4.0 gewinnt das MES nochmals an Bedeutung. Durch die zunehmende Digitalisierung, die Einführung cyber-physischer Systeme und die Nutzung von Künstlicher Intelligenz wird das MES zu einer intelligenten Schaltzentrale, die nicht nur erfasst und dokumentiert, sondern auch analysiert, vorausschauend plant und automatisiert eingreift. In einer vernetzten Fabrik, die sich durch hohe Dynamik, Individualisierung und Selbstoptimierung auszeichnet, ist das MES das Rückgrat für die operative Umsetzung dieser Prinzipien. Es fungiert als Datenhub, der Informationen aus IoT-Geräten, Sensoren, SPS-Systemen und Cloud-Diensten bündelt, strukturiert und in konkrete Maßnahmen umsetzt. [3] [35]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das MES eine Schlüsseltechnologie für die digitalisierte Fertigung darstellt. Es verbindet die physische Produktionswelt mit der digitalen Steuerungsebene, schafft Transparenz und Kontrolle und eröffnet damit neue Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung. Gerade in Hinblick auf zukünftige Anforderungen, wie eine hohe Produktvarianz, kurzfristige Planänderungen und nachhaltige Produktion, ist ein leistungsfähiges MES unverzichtbar für wettbewerbsfähige Fertigungsunternehmen.

2.7 EDGE Computing

Edge Computing beschreibt das Konzept, dass generierte Daten innerhalb eines Netzwerkes direkt verarbeitet werden. Das Wort „Edge“ (englisch) bedeutet übersetzt „Kante“. Es bedeutet, dass die erzeugten Daten an der Kante (oder am Rand) des Netzwerkes verarbeitet werden, um von dort an überstehende Systeme wir MES oder ERP weitergeleitet zu werden. Hierfür wird Rechenkapazität als Teil der Netzwerkperipherie benötigt. Dem Edge Computing ist das Cloud Computing gegenübergestellt, welches eine Datenverarbeitung mittels Rechenzentrum beschreibt. [37]

Im Feld der Produktionsanlagen, kann zwischen zwei Typen unterschieden werden, die sich aus der rasch fortschreitenden Entwicklung aller Technologien ergibt. Produktionsanlagen werden auf Zeiträume von mehr als 20 Jahren ausgelegt, um die enormen Kosten der Planung, des Baus und der Inbetriebnahme zu amortisieren. Dadurch existieren Anlagen, die nicht den heutigen Anforderungen von Industrie 4.0 entsprechen. Diese befinden sich in einem Brownfield (braune Fläche / bestehende Anlage). Ihnen gegenüber stehen moderne Anlagen, die allen aktuellen Anforderungen an Industrie 4.0 genügen. Diese befinden sich in einem Greenfield (grüne Wiese / neue Anlage). [38]

Der Einsatz einer Edge kann in jedem Fall Sinnvoll sein. Bei Brownfield-Anlagen, deren Steuerung über keinen OPC UA oder vergleichbare Kommunikationsprotokolle verfügen, bietet die Edge einen Sammelpunkt und Schnittstelle zu übergeordneten Systemen, um die Digitalisierung der Anlage zu erweitern. Zusätzlich sind keine neuen oder weiteren Maschinen notwendig. Weitere Vorteile einer Edge sind:

- Qualitätskontrollen: Aufwendige Bildverarbeitungen können direkt vor Ort etabliert werden. Dadurch werden Latenzen bei der Übertragung gespart und den Steuerungen Rechenleistung abgenommen.
- Anlagenverfügbarkeit (Predictive Maintenance): Durch ausgereifte Edge-Systeme können Sensordaten im großen Stil gesammelt und verarbeitet werden. Mittels gezielter Analyse können Vorhersagen über ungeplante Stillstände getroffen werden. Z.B. Werden Vibrations- und Temperaturdaten verarbeitet, wodurch Anomalien entdeckt werden können.
- Datensicherheit: Die Daten bleiben Lokal und werden nicht in Rechenzentren verarbeitet. Durch Lokalität kann die Anlage selbst bei Netzwerkproblemen (nicht das Anlagennetz) weiter betrieben werden.
- Skalierbarkeit: Die Edge ist lediglich durch ihre Lizenz und Rechenleistung begrenzt.
- Flexibilität: Die meisten Edge-Systeme verfügen über eine Vielzahl unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle. Integrierung heterogener Anlagen
  [39] [40] [41]

Es existiert eine Vielzahl an Anbietern für eine Edge. Die folgenden sollen einen Einblick gewähren und die Unterschiede in der Anwendung aufzeigen.

Anbieter	Produkt	Spezifikation
Siemens	Industrial Edge	Besonders für Siemens SPSen und Protokolle wie: Docker, OPC UA und MQTT
Beckhoff	TwinCAT IoT	Edge- und Cloud-Kommunikation in der Steuerung integriert. ADS, MQTT, OPC UA
Bosch Rexroth	ctrlX CORE & crtlX Data Layer	Offen für Drittanbieter durch eigene Datenlayer und REST und OPC UA
Phoenix Contact	PLCnext & Edge Device	Sehr Flexibel, da auf Linux-Basis
FORCAM	EDGE CONNECT	Standardisierte und MES-nahe Datenintegration im Brownfield

Tabelle 1: Edgeanbieter und ihre Schwerpunkte

Alle Anbieter verbindet ihre Maschinenanbindung, Datenverarbeitung, Protokollvielfalt, lokale Datenverarbeitung und Schnittstelle an MES oder ERP. [42] [43] [44] [45] [46]

Der Einsatz von Edge-Systemen in der industriellen Fertigung ist ein entscheidender Baustein für die erfolgreiche Digitalisierung und effiziente Anbindung von Maschinen an übergeordnete Systeme wie MES oder ERP. Durch die lokale Vorverarbeitung von Maschinendaten direkt an der Quelle – also „am Rand“ des Netzwerks – können Echtzeitanalysen, schnelle Reaktionen auf Prozessabweichungen und eine reduzierte Datenlast bei gleichzeitig erhöhter Datensicherheit realisiert werden.

Insbesondere in Brownfield-Umgebungen, in denen eine Vielzahl unterschiedlichster Maschinen und Steuerungen vorhanden ist, ermöglichen Edge-Geräte eine standardisierte und skalierbare Integration, ohne bestehende Anlagen verändern zu müssen.

Insgesamt trägt Edge Computing maßgeblich dazu bei, die Transparenz, Verfügbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit moderner Produktionssysteme nachhaltig zu verbessern.

FORCE EDGE CONNECT

Da im Zuge der praktischen Arbeit eine Edge von FORCAM zum Einsatz kommt, wird im Folgenden die FORCE EDGE CONNECT genauer beleuchtet.

Die FORCE EDGE CONNECT liegt im Bereich der Edge Computing Software und wird auf einem System installiert, welches sich im gleichen Netzwerk wie die Assets befindet. Assets sind die eingebundenen Geräte, wie SPS, Sensoren oder Aktoren.

Die Edge von FORCAM verfügt über zwei Links. Dem **Southbound Link** und dem **Northbound Link**. Der Southbound Link ist für die Kommunikaion zwischen den Assets und der Edge zuständig. Da die Edge in der Automatisierungspyramide über den Assets angesiedelt kommuniziert die Edge nach „Unten“ oder nach „Süden“. Der Northbound Link stellt die Kommunikation zum MES oder anderen Plattformen dar, welche in der Automatisierungspyramide oberhalb (oder „nördlich“) angesiedelt sind. Dies ist in Abb. 7 ersichtlich.

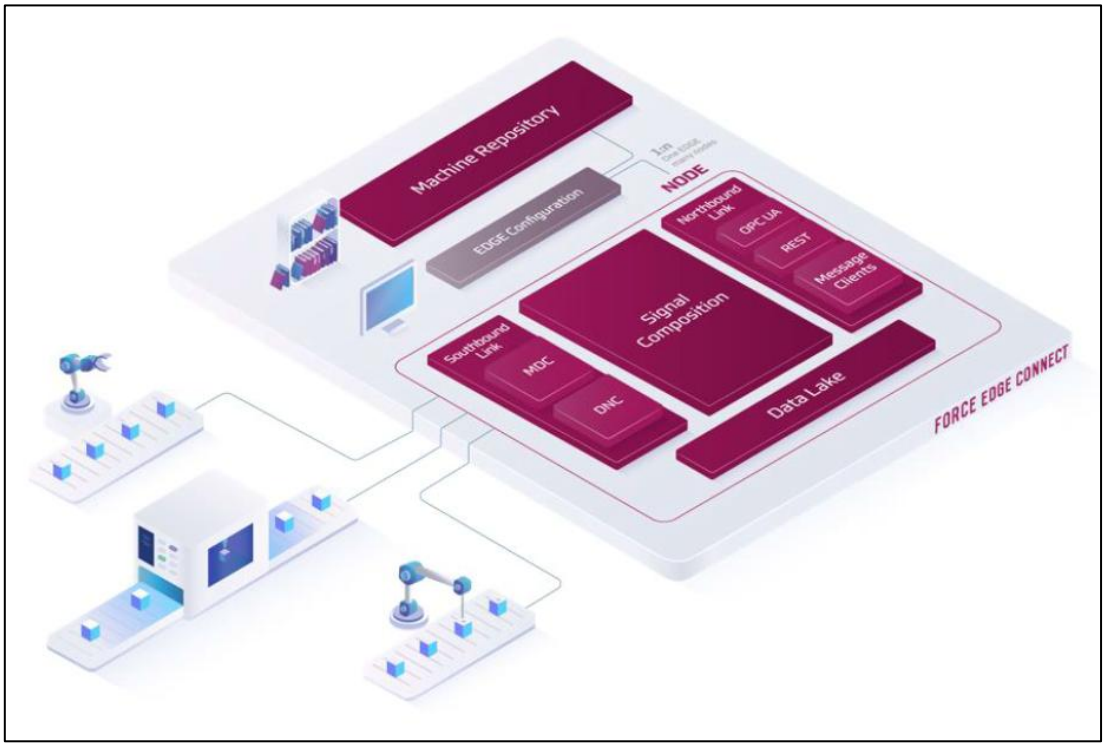


Abbildung 7: Schematische Aufbau von EDGE CONNECT [46]

Die Kommunikation des Southbound Links findet über MDC-Plug-in (Machine Data Collection), DNC-Plug-ins (Distributed Numerical Control) oder Kommunikationsprotokolle wie MQTT oder OPC UA statt. Die Weitergabe von Daten über den Northbound Lake findet über HTTP/REST, MQTT, Apache Kafka, OPC UA oder NATS.io statt.

Weiterhin verfügt die FORCE EDGE CONNECT über die Möglichkeit ein **Data Lake** zu implementieren, welches mit KI-Algorithmen oder Visualisierungstool ausgestattet werden kann. Mithilfe derer können Anomalien frühzeitig erkannt und Stillständen vorgebeugt werden.

Im Zuge der Konfiguration der Edge ist es möglich mehrere Edges zu im gleichen System zu etablieren. Jede dieser Edges wird EDGE-Knoten genannt und kann wiederum mit mehreren Assets verbunden werden. Die Einrichtung eines Knoten kann über das Machine Repository stückweise Automatisiert werden, indem aus EDGE-Knoten Templates erstellt werden, die sämtliche Konfigurationen enthalten und immer wieder verwendet werden können. Dadurch ist es möglich innerhalb kurzer Zeit einen weiteren EDGE-Knoten in einem System zu installieren.

3. Weiterentwicklung der SPS-Architektur

Das SPS-Programm wurde aus verschiedenen Gründen vollständig neu erstellt. Zum einem war das Programm zu unübersichtlich, da nicht eine einzige Gruppe die gesamte Anlage programmierte, sondern alle Gruppen ihre eigene Station. Jede Gruppe hatte unterschiedlich viel Erfahrung in der Programmierung sowie unterschiedliche Ansichten darüber, wie die Schnittstellen zu definieren sind. Dies führte zu unübersichtlichen Schnittstellen und einer hohen Fehleranfälligkeit im Programmablauf. Eine Teilprogrammierung durch jede Gruppe wäre möglicherweise erfolgreich gewesen, wenn in einer vorherigen Absprache eine klare Struktur festgelegt und die Schnittstellen zwischen den Stationen klar definiert worden wären.

3.1 Konzept

Einige Teile des alten Programms konnten wiederverwendet werden. Dazu zählen die Umleger, die Ansteuerung des Förderbands, das Sicherheitsrelais sowie die Aufzeichnung der Daten für das Daten-Monitoring. Im Zuge der Neuprogrammierung mussten auch für Roboter 1 und Roboter 3 vollständig neue Bewegungsabläufe erstellt werden.

Aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit im vorherigen Programm, wird im neuen eine zentrale Instanz erstellt, die alle Stopper gleichzeitig ansteuert. Dadurch wird sichergestellt, dass sich pro Station nur ein Werkstückträger befindet. Wenn eine Station fertig ist, signalisiert sie der SPS ihren Status. Die SPS sammelt den Status aller Stationen ein und schaltet die Stopper erst, wenn alle Stationen ihre Aufgaben erledigt haben. Dieses Vorgehen verhindert Kollisionen zwischen Robotern und Werkstückträgern sowie eine allgemeine Staubildung vor den Umlegern. Aufgrund dessen werden klare Schnittstellen für die Stationen geschaffen. Ab sofort tauschen die unterschiedlichen Stationen keine Daten mehr untereinander aus, um ihre Aufgaben zu erfüllen. Stattdessen benötigt jede Station nur noch Informationen, die den aktuellen Auftrag betreffen. Ausgenommen sind die Qualitätsdaten, die von Station 5 zu Station 6 übermittelt werden. In Zukunft kann das Programm dank der klaren Struktur,

eindeutigen Schnittstellen und der zentralen Steuerung der Stopper sehr einfach erweitert werden

3.2 Auftragsverwaltung

Die Auftragsverwaltung ist ein eigens erstellter Funktionsbaustein. Er ermöglicht es, einen Auftrag über das HMI-Panel zu erstellen. Es muss festgelegt werden, welcher Prozess ausgeführt werden soll (Montage oder Demontage), welche Variante gefertigt wird und wie viele Einheiten gefertigt bzw. demontiert werden sollen. Sind alle erforderlichen Daten eingegeben, kann der Auftrag über den dedizierten Knopf gestartet werden. Falls „Montage“ ausgewählt wurde, jedoch keine Variante angegeben, setzt sich die Auftragsverwaltung automatisch zurück.

Durch das Betätigen des Knopfes werden die eingegebenen Informationen in die SPS übertragen, dort ausgewertet und anschließend an die Stationen weitergeleitet.
Dort werden zum Beispiel einmalig die Zähler auf die Auftragsanzahl gesetzt.
Außerdem werden per Knopfdruck alle Stationen auf ihren Ausgangspunkt zurückgesetzt.
Dadurch wird eine undefinierte Ausgangslage vermieden.
Der Knopfdruck setzt auch ein SR-FlipFlop. Dieses FlipFlop verriegelt das HMI-Panel, um während des laufenden Auftrags zu verhindern, dass die Auftragsdaten geändert werden. Das FlipFlop wird durch das Signal „Demontage_fertig“ oder „Montage_fertig“ zurückgesetzt. Diese Signale werden von Station 1 oder Station 6 erzeugt. Zusätzlich steht ein Knopf zur Verfügung, um den Auftrag manuell abzubrechen.

In Zukunft soll der Auftrag über die Edge an die SPS übermittelt werden.
Die Auftragsverwaltung existiert aufgrund der Verzögerung der MES-Implementierung. Nach der Implementierung kann überlegt werden, ob der Baustein bestehen bleibt oder vollständig entfernt wird. Bei einer Entfernung ist zu beachten, dass die bestehenden

Variablen korrekt verknüpft werden. Sollen beide Varianten parallel existieren, muss eine gegenseitige Verriegelung erstellt werden.

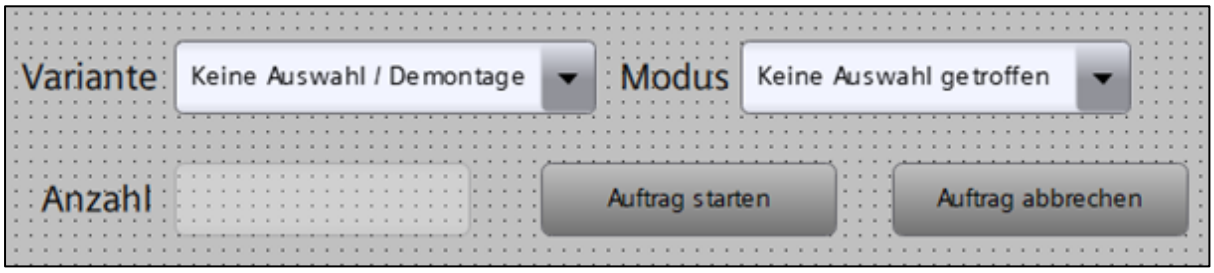


Abbildung 8: HMI Auftragsmaske

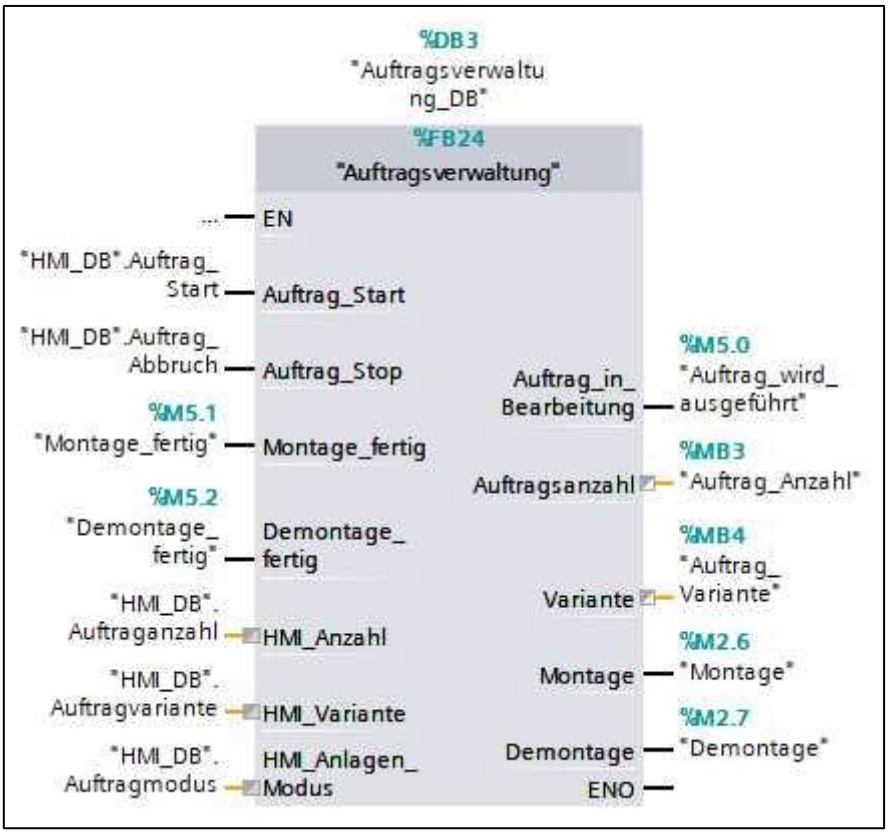


Abbildung 9: Auftragsverwaltung FB

3.3 Stopper Kontrolle

Dieser Funktionsbaustein ist das Herzstück der Programmierung. Wie bereits erwähnt, laufen dort alle Stationsinformationen zusammen, ob sie ihre jeweiligen Aufgaben bereits erledigt haben oder noch ausstehen. Jedes „fertig“-Signal der Stationen wird auf einem eigenen SR-FlipFlop gespeichert. Die Stopper werden für eine Sekunde gesetzt, wenn alle Stationen fertig sind, sich die Umleger in ihrer Ausgangsstellung befinden und das Förderband aktiv ist. Wenn die Stopper gesetzt werden, wird auch für eine Sekunde an alle Stationen ein „Reset“ ausgegeben. Dieser „Reset“ setzt die Station in ihren Anfangszustand szurück. Wenn ein neuer Träger vom induktiven Sensor am Stopper erkannt wird, beginnt die Station von Neuem mit ihren Aufgaben.

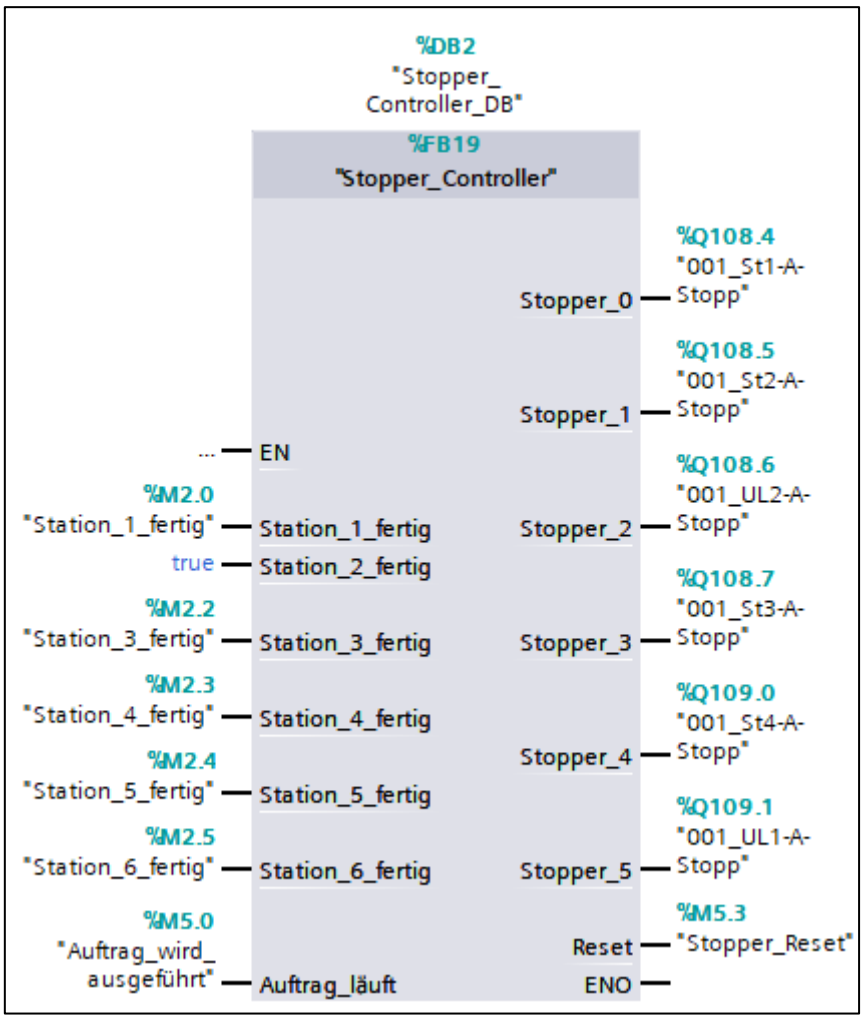


Abbildung 10: Stopper_Controller FB

3.4 Station 1

Roboter 1 besitzt drei verschiedene Jobs, die er zu erledigen hat. Er erhält dazu folgende Signale von der SPS und sendet im Gegenzug Signale an die SPS zurück:

Job 1 bei Montage	Werkstück von Magazin auf Träger setzten	Output.register[0]
Job 2 bei Montage	Fertig montiertes Werkstück vom Träger auf den Husky setzen	Output.register[1]
Job 3 bei Demontage	Das zu demontierende Werkstück vom Husky auf den Träger setzen	Output.register[2]

Tabelle 2: Station 1 Roboteransteuerungsübersicht

Job 1 fertig	Roboter fertig oder Auftragsanzahl erreicht oder Demontage aktiv	Input.register[0]
Job 2 fertig	Roboter fertig oder leerer Werkstückträger oder Demontage aktiv	Input.register[1]
Job 3 fertig	Roboter fertig oder Auftragsanzahl erreicht oder Montage aktiv	Input.register[2]

Tabelle 3: Signale von Roboter 1 zur SPS

Roboter 1 sendet nach Abschluss eines Jobs einen 0,1 Sekunden langen Impuls an die SPS über das entsprechende Input Register. Dieses Signal dient dazu, den Job in der SPS als erledigt zu markieren, eine erneute Ausführung zu verhindern und die Auftragsanzahl mithilfe eines

Zählers um eins zu reduzieren. Jeder Job verfügt über einen eigenen Zähler. Wenn beispielweise der Zähler von Job 1 den Wert „0“ erreicht, wird dieser Job dauerhaft als erledigt markiert, sodass der Roboter ihn nicht mehr ausführt. Wenn auch der Zähler von Job 2 den Wert „0“ erreicht, wird das Signal „Montage fertig“ an die Auftragsverwaltung gesendet. Während der Montage wird Job 3 dauerhaft als erledigt markiert und bei der Demontage hingegen Job 1 und 2 dauerhaft als fertig markiert. Erst wenn alle drei Jobs erledigt sind, signalisiert die Station an den Stopper_Conroller FB, dass sie fertig ist.

Der Roboter erhält mithilfe der ifm Kamera „O3Dxx“ die Position des Huskys. Die Kamera wird mit dem Starten des Auftrages einmalig getriggert, da aktuell keine Kommunikation von Husky zur SPS besteht. Das Triggersignal muss nach erfolgreicher Implementierung der Kommunikation angepasst werden. Getriggert werden muss jedes Mal wenn der Husky ankommt und eine andere Position aufweist.
Die Ansteuerung der Kamera befindet sich im FC „read_data“ im Ordner „O3Dxx“.
Die Umrechnung der Koordinaten befindet sich im „Station_1“ FB. Dort werden auch die Daten mithilfe von drei Float-Registern an den Roboter übertragen. Für genauere Information, die die Vorgehensweise der Erkennung und Umrechnung der Koordinaten betrifft, kann in der Studienarbeit der Gruppe „Lagererkennung Bauteile“ nachgelesen werden.

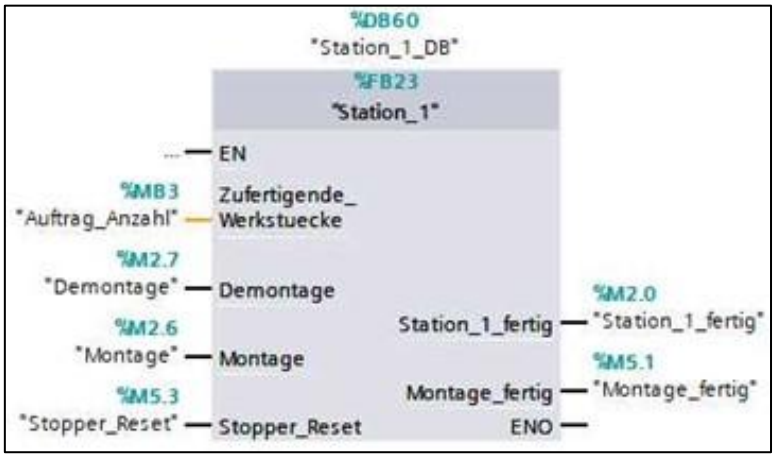


Abbildung 11: Station 1 FB

3.5 Station 2

Hier soll der QR-Code von einer ifm-Kamera gelesen werden. Grundsätzlich funktioniert die Station, jedoch wurden die Positionen der QR-Codes auf den Bauteilen verändert. Deshalb kann die Kamera die QR-Codes nicht mehr lesen. Um die geforderte Funktion zu erfüllen, müsste die Kamera anders platziert und neu eingelernt werden. Jedoch ist die Station platzbedingt sehr eng, einschließlich des Verfahrwegs des Roboter, sodass ein Umhängen sehr kompliziert wäre, um alle QR-Codes zuverlässig zu erfassen.

Für die Funktion wurde ein Funktionsbaustein erstellt, der den herstellerspezifischen Baustein enthält, zur Bedienung der Kamera. Das „Trigger“ Signal soll ein Impuls sein, wenn Station 1 fertig ist und das „Done“ Signal wird direkt auf „Station_2_fertig“ geleitet.

3.6 Station 3

An dieser Station wird das Bin Picking durchgeführt. Folgende Signale werden an die Station gesendet und von der SPS empfangen:

In der Montage wird an die Station die Variante auf „Mikado_out_profi.productID“ (%QW150) geschrieben und der Prozess wird über „Mikado_out_profi.cmd“ (%QW146) mit dem Kommandowert „6“ gestartet. Die Station sendet auf die Variable „Bin_Picking_fertig“ (%I424.0) einen kurzen Impuls, um anzuzeigen, dass sie fertig ist. Dieser Impuls verringert den Auftragszähler der Station um eins, setzt den Job als erledigt und verhindert eine erneute Ausführung. Das Signal, das an den Stopper_Controller FB geht, wird um eine Sekunde verzögert. Dadurch wird gewährleistet, dass der Pin richtig sitzt. Wenn der Auftragszähler den Wert „0“ erreicht, wird der Job dauerhaft als erledigt markiert. Ebenfalls wird der Job als erledigt markiert, wenn sich die Anlage in der Demontage befindet oder ein leerer Werkstückträger an der Station steht. Zur Sicherheit wird der Kommandowert auf „0“ gesetzt,

wenn der Job erledigt ist oder der Zähler den Wert „0“ erreicht. Dadurch wird ein Starten des Bin Picking Roboters mit 100%iger Sicherheit verhindert.

Aktuell gibt es noch Probleme im Bin Picking Programm. Der Roboter fährt öfters einen Crash oder verdreht sich zu weit. Auch das Messen der Pins ist nicht vollständig ausgereift. Momentan wird Station 3 ohne Messung der Pins betrieben.

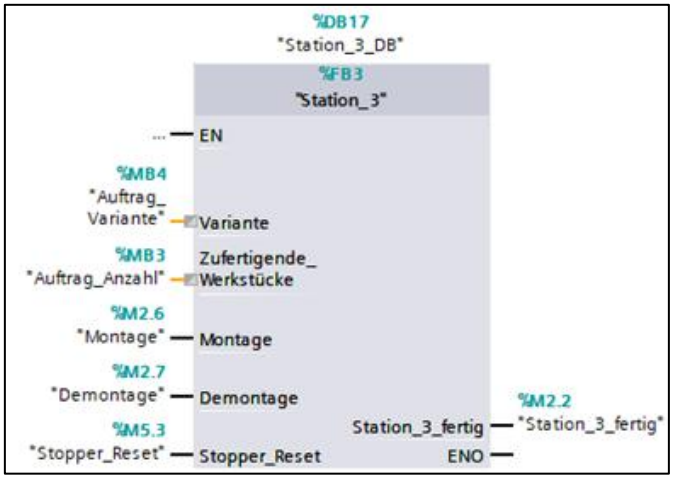


Abbildung 12: Station 3 FB

3.7 Station 4

Hier wird der Handarbeitsplatz realisiert. Die Station erkennt selbstständig, ob ein leerer Träger vorhanden ist und setzt automatisch die Variable „Station_4_fertig“. Befindet sich ein Werkstück auf dem Träger, wird automatisch eine Zeiterfassung gestartet. Bei erneuter Auflage des montierten Werkstückes bzw. demontierten, wird die Station nach fünf Sekunden fertig gesetzt und das Ergebnis der Zeiterfassung in ein Array geschrieben, das 50 Zeitslots enthält. Die Lichtschranke am Handarbeitsplatz ist nicht in Gebrauch aber mit der SPS verbunden.

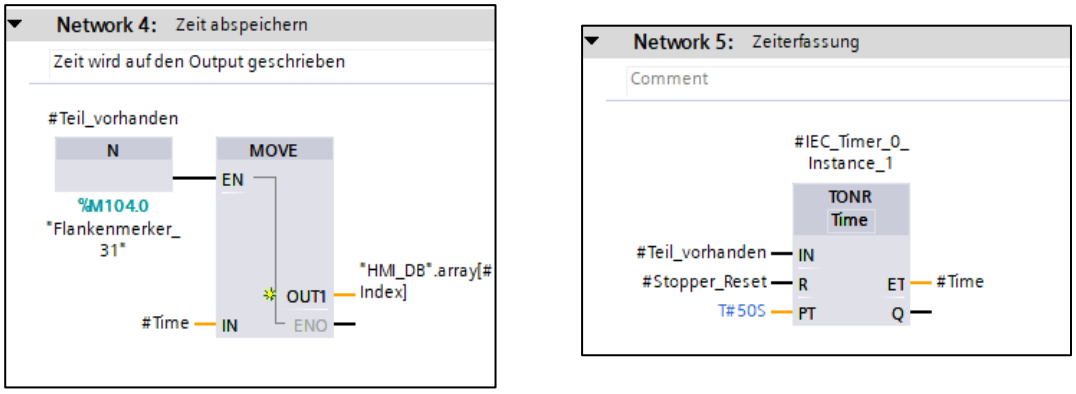


Abbildung 13: Zeiterfassung Handarbeitsplatz

Die Variable „Teil_vorhanden“ wird zurückgesetzt, wenn das Werkstück bereits erfasst wurde und die Lichtschranke erneut eine positive Flanke sendet.

Zukünftig könnte das ifm-Mate direkt an die SPS angeschlossen werden und über dieses System die Rückmeldung erhalten, ob die Station fertig ist.
Eventuell wäre es möglich die Zeiterfassung ebenfalls über das ifm-Mate zu realisieren. Hierfür sind jedoch weitere Nachforschungen nötig, um zu klären, ob solch eine Funktion verfügbar ist.

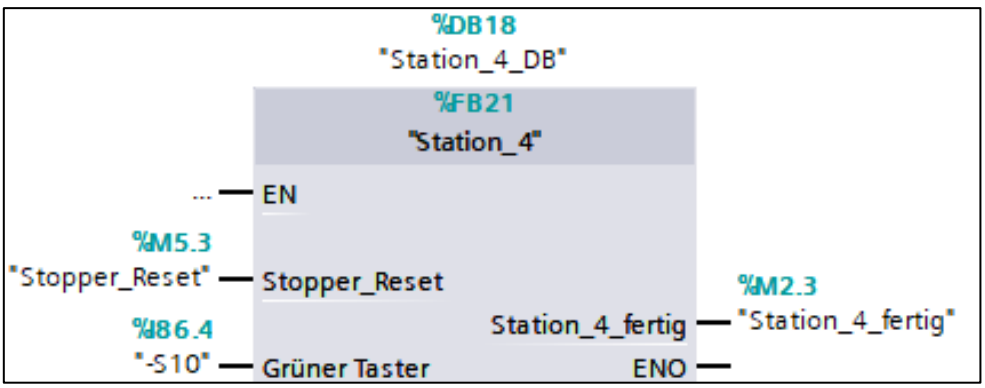


Abbildung 14: Station 5 FB

3.7 Station 5

Für die Qualitätsprüfung wird eine Wenglor-Kamera eingesetzt, um die Kreislaufwirtschaft umzusetzen. In dieser Kamera wurde ein Referenzbild anlegt, das Kriterien für die Demontage festlegt. In der Montage und in der Demontage bei leerem Träger wird die Station dauerhaft als fertig markiert.

Werkstück	Kriterium	Gut	Schlecht
Großes Bauteil	Tasche links	True	False
Großes Bauteil	Tasche rechts	True	False
Kleines Bauteil	Nase links	True	False
Kleines Bauteil	Nase rechts	True	False

Tabelle 4: Station 5 Qualitätskriterien

Wenn sich ein Bauteil auf dem Träger befindet, wird die Kamera mit einer Verzögerung von einer halben Sekunde getriggert. Danach erhält die SPS vier Variablen, die die Qualität betreffen. Diese werden miteinander verglichen und es wird separat entscheiden, ob die Bauteile in Ordnung sind. Die Variable für „Kamera_fertig“ toggelt. Das bedeutet: Wenn das Signal „true“ ist und die Kamera ein Bild aufgenommen hat, wird das Signal auf „false“ gesetzt. Nachdem es „false“ ist und die Kamera ein weiteres Bild aufgenommen hat, wird das Signal erneut auf „true“ gesetzt. Somit muss die Variable „Kamera_fertig“ sowohl durch eine negative als auch durch eine positive Flankenabfrage detektiert werden.

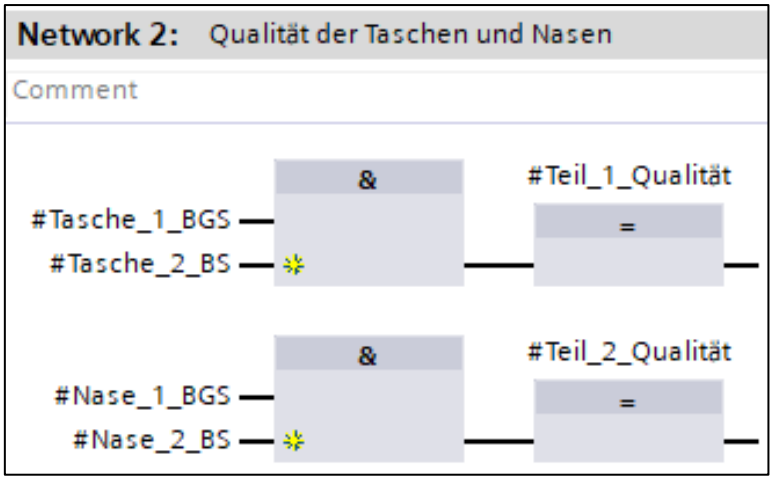


Abbildung 15: Qualitätskriterien zusammenführen

BS = Bedienerseite (zur Rutsche)

BGS = Bedienergegenseite (zum Bin Picking)

In Zukunft könnte auch die Montage mittels Qualitätskontrolle erfolgen. Hierfür muss in der Kamera ein zweiter Job angelegt werden und die SPS teilt der Kamera mit, ob eine Montage- oder Demontageprozess anliegt. Ebenfalls müssen die erhaltenen Daten an Station 1 und Station 6 weitergeleitet werden. Zum Beispiel: Wenn das montierte Werkstück gut ist, darf Roboter 1 es auf den Husky absetzen. Ist das montierte Werkstück hingegen schlecht, muss Roboter 3 es auf die Rutsche setzen (zurück zum Handarbeitsplatz). Für die Realisierung müsste Roboter 3 einen weiteren Job in der Montage erhalten und Roboter 1 dürfte Job 2 nur ausführen, wenn das montierte Teil in Ordnung ist.

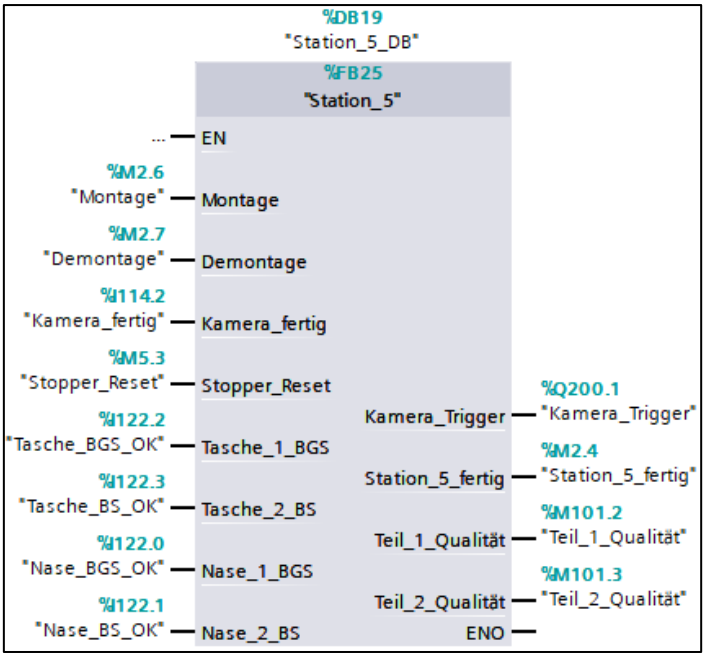


Abbildung 16: Station 5 FB

3.8 Station 6

Diese Station ist momentan ausschließlich für die Demontage verantwortlich und ist relativ ähnlich wie Station 1 aufgebaut (Zähler und Jobs). Dafür benötigt sie die Auftragsinformationen sowie die Qualitätsdaten der Bauteile von Station 5. Bei einem Stopperreset werden die Qualitätsdaten in den FB übernommen und ausgewertet. Dadurch wird verhindert, dass Station 6 direkt auf diese Informationen reagiert, wenn in Station 5 ein neues Foto aufgenommen wird.

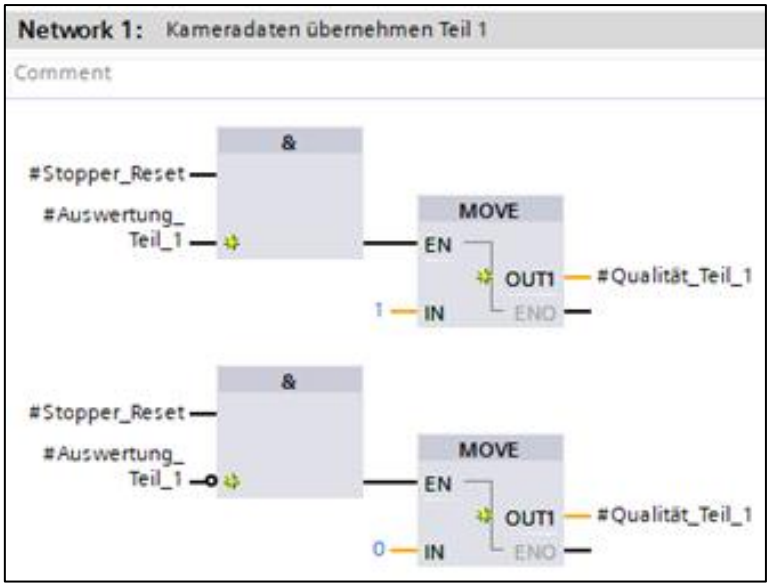


Abbildung 17: Station 6 Qualitätsdaten übernehmen

Die Variablen „Qualität_Teil_1“ und „Qualität_Teil_2“ werden für die Ansteuerung der Roboter-Register verwendet (zur Ausführung der Jobs):

Job 1 bei Demontage	Teil_1_Qualität = „1“	Großes Bauteil in Magazin zurück	Output.register[0]
	Teil_1_Qualität = „0“	Großes Bauteil in „Kiste“ (Ausschuss)	Output.register[1]
Job 2 bei Demontage	Teil_2_Qualität = „1“	Kleines Bauteil auf Rutsche zum Handarbeitsplatz	Output.register[2]
	Teil_2_Qualität = „0“	Kleines Bauteil in „Kiste“ (Ausschuss)	Output.register[3]

Tabelle 5: Station 6 Roboteransteuerungsübersicht

Job 1 fertig	Roboter fertig oder Auftragsanzahl erreicht oder leerer Werkstückträger oder Montage aktiv	Input.register[0]
		Input.register[1]
Job 2 fertig	Roboter fertig oder Auftragsanzahl erreicht oder leerer Werkstückträger oder Montage aktiv	Input.register[2]
		Input.register[3]

Tabelle 6: Signale von Roboter 3 zur SPS

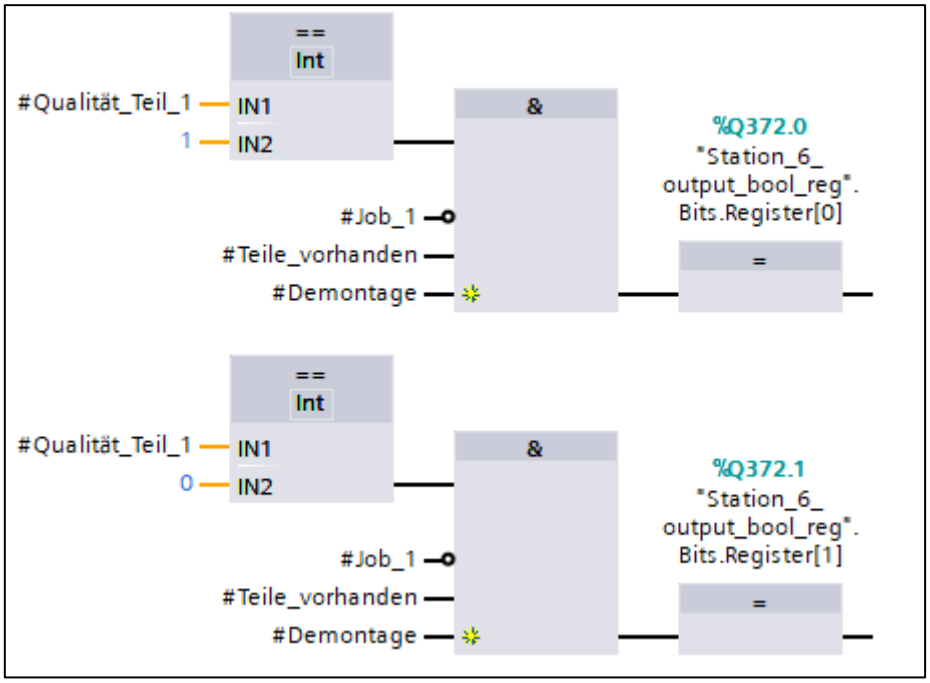


Abbildung 18: Station 6 Beispiel Ansteuerung

Eine wichtige Funktion für die Station ist das Abspeichern, ob die Teile vorhanden sind oder nicht. Denn wenn der Roboter zuerst das große Bauteil herunternimmt, wird der Lichttaster „false“ gesetzt. Dadurch würde die Station annehmen, dass kein Bauteil vorhanden ist und die Variable „Station_6_fertig“ setzen. Deshalb wird mithilfe eines SR-FlipFlop gespeichert, dass Bauteile vorhanden sind.

Die Variable „Demontage fertig“, die für die Auftragsverwaltung benötigt wird, setzt sich aus zwei Zählern zusammen. Der erste Zähler zählt die großen heruntergenommenen Bauteile und der zweite Zähler zählt die kleinen heruntergenommen Bauteile. Erst wenn beide Zähler den Wert „0“ aufweisen, wird „Demontage fertig“ gesetzt.

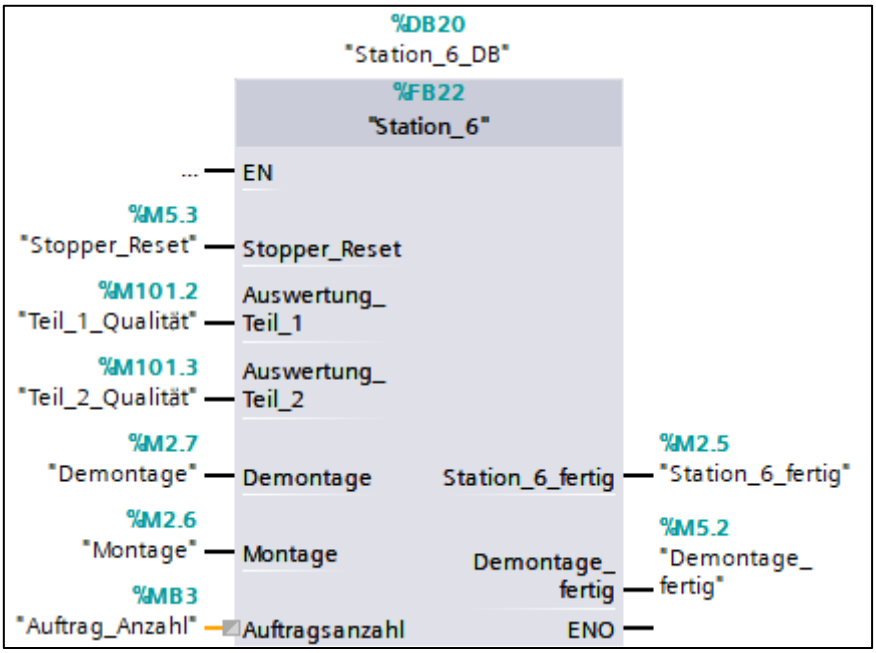


Abbildung 19: Station 6 FB

3.9 Magazine

Station 1 und Station 6 verfügen nur über eine begrenzte Anzahl von Bauteilen bzw. Werkstücken, die verarbeitet werden können. Die Kapazität der Magazine wird innerhalb des jeweiligen Stationsbausteins mit einem oder mehreren Zählern umgesetzt.

Station 1 besitzt für die Montage ein Magazin mit acht Bauteilen. Nachdem diese Anzahl verarbeitet wurde, leuchtet auf dem HMI eine rote Lampe auf, die signalisiert, dass das Magazin befüllt werden muss. Station 1 wird erst wieder Bauteile entnehmen, wenn auf dem

HMI-Panel bestätigt wurde, dass das Magazin befüllt ist. **Wichtig ist**, dass das Magazin erst befüllt werden darf, wenn das Signal auf dem HMI erscheint. Der Roboter 1 verfährt im Palettiermodus (feste Ablauffolge) und entscheidet nicht variabel, wo sich noch Bauteile befinden.

Ebenfalls befindet sich an dieser Station der Husky. Dieser verfügt über eine Kapazität von sechs montierten Bauteilen. Aktuell wird davon ausgegangen, dass bei jedem neuen Auftrag der Husky entweder komplett leer oder komplett voll bereitsteht.
Der Grund hierfür ist eine noch nicht funktionierende Kommunikation zwischen Husky und SPS. Wenn eine Montage oder Demontage mit über 6 Werkstücken stattfindet, wird beim Erreichen der Anzahl der Roboter 1 verriegelt und auf dem HMI leuchtet eine Lampe auf. Der Bediener muss dann das Magazin des Huskys händisch leeren und auf dem HMI über den entsprechenden Knopf bestätigen, dass das Magazin wieder bereit ist. Dasselbe geschieht bei der Demontage, wenn sechs Werkstücke von Roboter 1 auf das Förderband gelegt wurden. Es geht erst weiter, wenn der Husky erneut befüllt wurde und per Knopf bestätigt wird, dass das Magazin bereit ist. (siehe Abb. 20)

Normalerweise sollte bei der Montage, die SPS an den Husky ein Signal senden, dass er voll ist und losfahren kann. Bei der Demontage sollte die SPS an den Husky ein Signal senden, wenn er leer ist und neue Werkstücke vom IWT holen soll.
In Zukunft sollten dann auch die Quittier-Signale vom HMI an die Magazinzähler der jeweiligen Station durch die des Huskys ersetzt werden. Außerdem muss an Station 1 eine Erkennung implementiert werden, ob der Husky vor Ort ist.
Erst dann dürfen die Register des Roboter 1 beschrieben werden.

Station 6 verfügt über ein Magazin für sechs Bauteile. In diesem Magazin werden die großen „Gut“-Bauteile von Roboter 3 abgelegt. Wenn sich sechs Teile in dem Magazin befinden, wird der Roboter 3 verriegelt, eine Lampe am HMI leuchtet auf und es geht erst weiter, wenn das Magazin geleert und quittiert wurde.

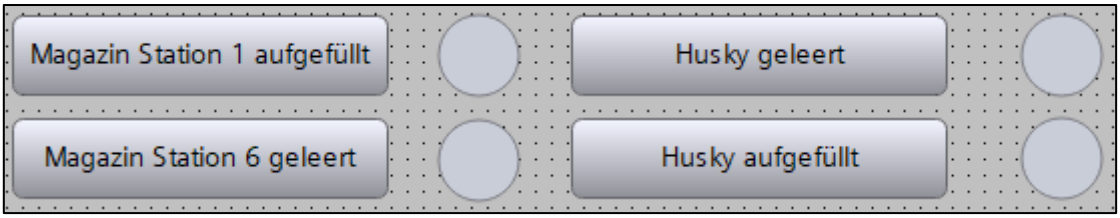


Abbildung 20: HMI Magazine Anzeige/Quittieren

4. Umsetzung der MES-Anbindung mit Forcam

Die Auftragsverwaltung für die Montage- und Demontageprozesse im PTZ und im IWT sollen über ein MES von Forcam erstellt und verwaltet werden. Aus Sicht der Zukunftsfabrik im PTZ sollen die Daten der Produktionslinie von der SPS über die FORCE EDGE CONNECT an das MES geführt werden. Im Idealfall soll bereits auf der Edge eine Vorsortierung der Daten erfolgen.

Aufgrund des langen Beschaffungszeitraums des Servers für den MES-Server und das Ausfallen der Schulung von FORCAM existiert kein MES-System. Eine Edge wurde im PTZ installiert, doch Aufgrund anderer Prioritäten wurde keine Anbindung vorgenommen.

Bei der Übergabe der Anlage ist der Stand gewesen, dass die Edge nicht mehr auf dem Computer im PTZ laufen soll, sondern mit auf dem Server läuft, welcher auch dem MES-System dient.

4.1 Forcam-Edge Installation und Konfiguration

Es wurde eine Edge auf dem Computer des PTZ installiert und versucht mit in das System zu integrieren.

Um die Edge zu installieren, wurde eine Linux-VM mittels Hyper-V auf dem Rechner des PTZ erstellt. Wie in Abb. 21 Zu sehen ist.

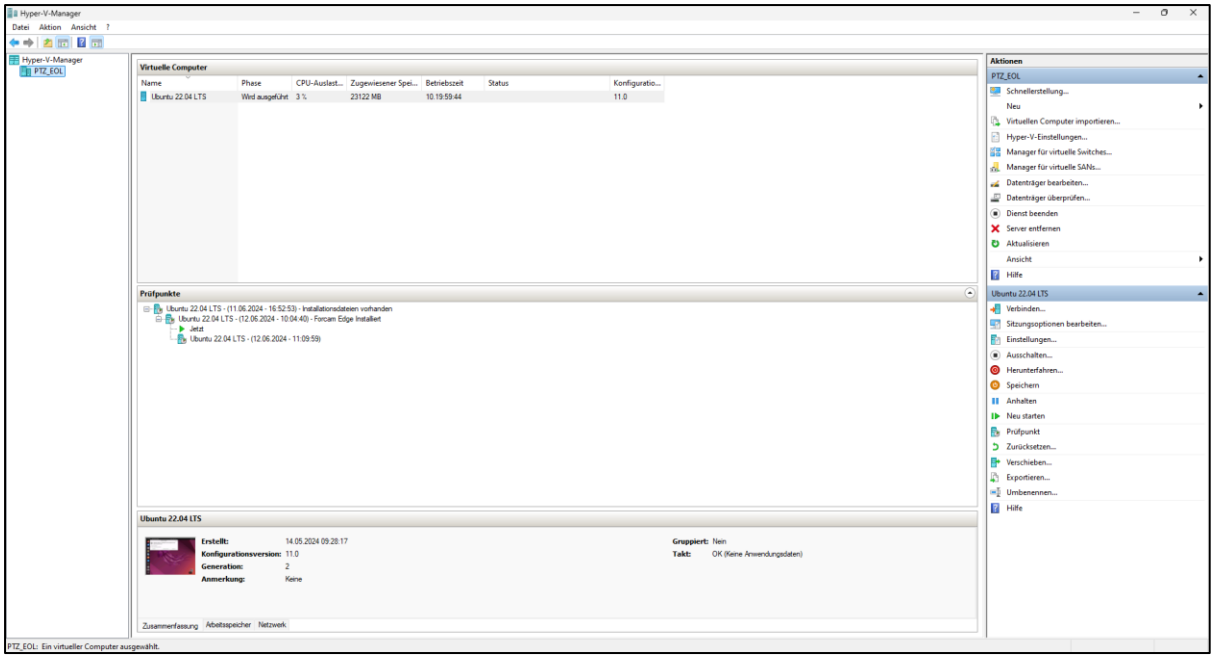


Abbildung 21: Hyper-V-Manager

Nach Erstellen der VM und Einrichten von Linux wurde über die Installationsdatei von Forcam die FOCE EDGE CONNECT installiert. Abb. 22 und Abb. 23 zeigen Auszüge der Installationsanleitung, wie die Edge zu installieren ist und wie sie anschließend gestartet werden kann.

Open — HowToInstall.md — ~/Edge/ForceEdgeInstaller-240408-H01 — Save

```
1 Prerequisites:
2 --------------
3
4 1. This installer supports both Windows and Linux machines
5 2. Openjdk version "11.0.x" is required.
6 3. Docker (20.10.x) and Docker compose (1.28.*) are required.
7 4. Provide the self-signed for each installing application.
8     * This could be one file that contains the public and private key.
9     * Public key should begin and end with below format
10      -----BEGIN CERTIFICATE-----
11      -----END CERTIFICATE-----
12    * Private key should also begin and end with below format
13      -----BEGIN PRIVATE KEY-----
14      -----END PRIVATE KEY-----
15 5. Enable tcp communication to access Docker API.
16    > Window Machine:
17     * Open Docker Desktop
18     * Click on settings button on top of Docker Desktop
19     * Click on the selection box of 'Expose daemon on tcp://localhost:2375 without TLS.'
20     * Click on the 'Apply & Restart' button.
21    > Linux Machine:
22     * Use non-root user to install the edge applications.
23     * Get 'IPV4 address for docker0', which you can see after login 'system information.' By default, this address is
   '172.17.0.1'.
24     * Add the following entries in /etc/hosts using “sudo vi /etc/hosts” command.
25       Use the same IP which you will get from 'IPV4 address for docker0.'
26       172.17.0.1
27       host.docker.internal 172.17.0.1
28       gateway.docker.internal 172.17.0.1
29     * Use 'sudo vi /lib/systemd/system/docker.service' command to edit docker service
30     * Modify the line that starts with ExecStart to look like this. Only add ' -H tcp://172.17.0.1:2375' in the end.
   Use same ip of 'IPV4 address for docker0'
31       ExecStart=/usr/bin/docker daemon -H fd:// -H tcp://172.17.0.1:2375
32     * Save the modified file.
33     * Execute the following commands:
34       'systemctl daemon-reload.'
35       'sudo service docker restart'
36     * Check if running or not by executing command 'curl http://172.17.0.1:2375/version'
```

Markdown — Tab Width: 8 — Ln 1, Col 1 — INS

Abbildung 22: Installationsanleitung Forcam

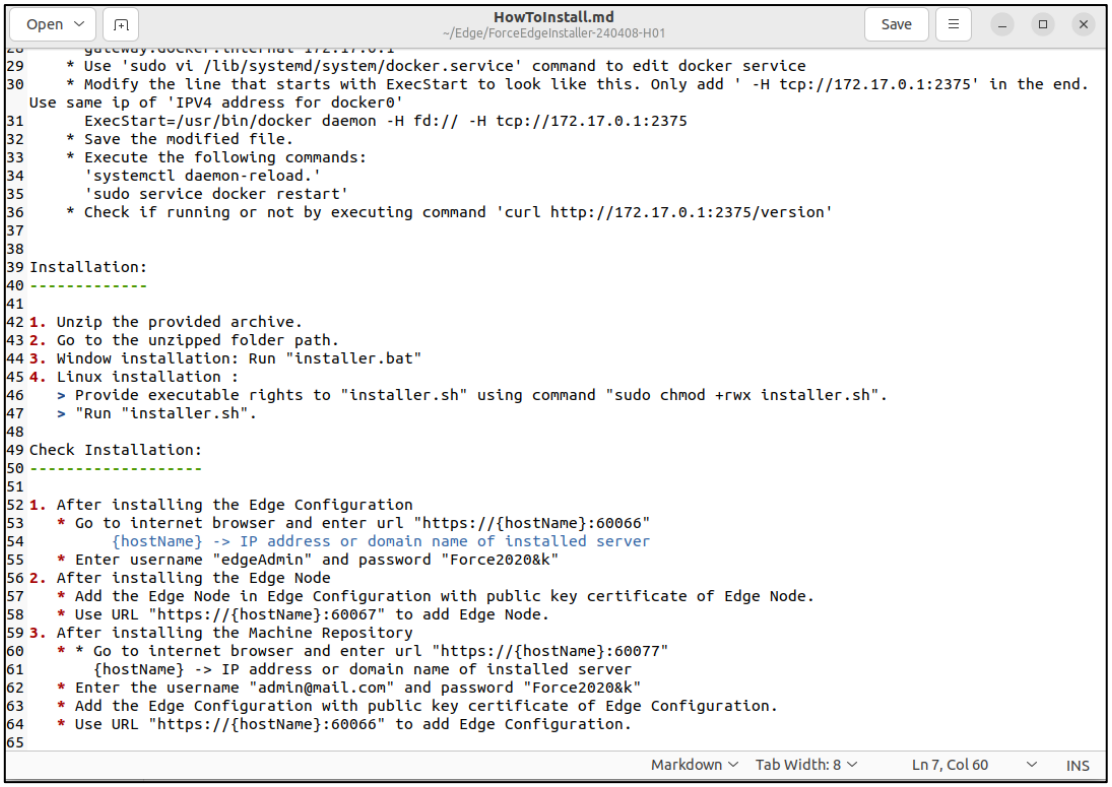


Abbildung 23: Installationsanleitung Forcam

Bevor die Edge genutzt werden kann, muss eine Netzwerkverbindung hergestellt werden. Dafür existiert eine Netzwerkkarte in dem PC im PTZ, welche der VM zugewiesen wurde. Dadurch ist es möglich die Edge an zwei unterschiedliche Netzwerke anzuschließen und die Kommunikation zwischen den Assets und dem MES-System zu ermöglichen.

Mit integrierter Netzwerkkarte ist es möglich die Edge zu konfigurieren. Hierfür der Anleitung aus Abb. 23 folgen.

Abb. 24 zeigt die provisorisch konfigurierte Edge.

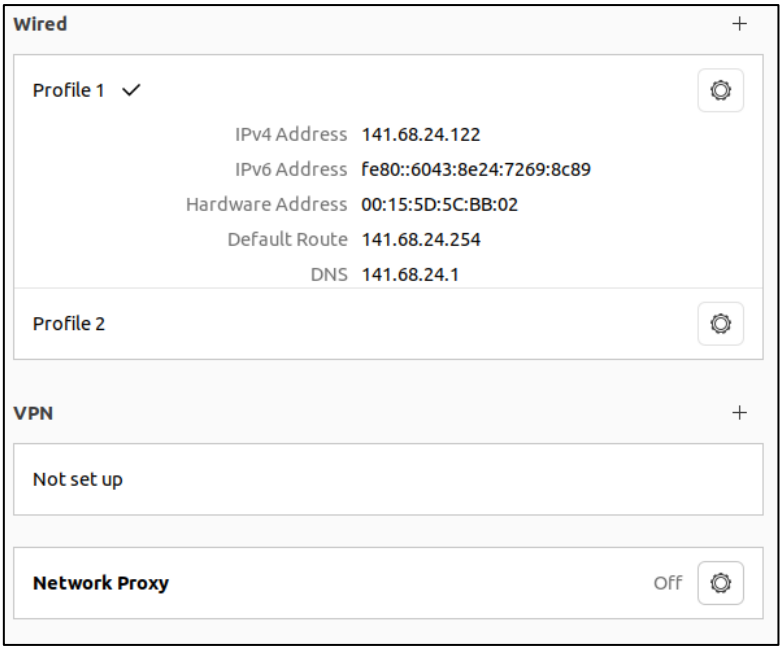


Abbildung 24: Netzwerkkonfiguration der Edge

4.2 Fazit der Forcam Edge

Die Edge bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten, um Daten zu sammeln, aufzubereiten und weiterzugeben. Diese konnten im Zuge dieser Studienarbeit nicht ausgeschöpft werden. Grund hierfür waren lange Lieferzeiten des Servers, sowie fehlender Schulung zur Implementierung der Edge.

Durch die Umfangreichen Aufgaben der Umstrukturierung der SPS-Architektur, sowie der Inbetriebnahme, war es nicht möglich sich selbst in das Thema der Edge einzuarbeiten.

Des Weiteren ist auch die Frage, ob der Einsatz einer Edge überhaupt sinnvoll ist. Zum einen bietet die verwendete SPS die Möglichkeit über OPC UA zu kommunizieren, wie auch das MES. Da die generierte Datenmenge überschaubar ist, sollten die Fähigkeiten des MES zur Datenverwaltung ausreichen, um eine Sortierung und Speicherung in einem eventuellen Data Leak zu ermöglichen. Die Edge ist selbst kein Data Leak, sondern dient zur Datenverarbeitung

und Zwischenspeicher. Um den Umgang mit der Edge-Systemen zu lernen ist die Etablierung des Systems durchaus sinnvoll.

Falls die Edge in der Zukunft auf einem Server außerhalb des Fertigungsnetzes liegt und auch räumlich getrennt ist, handelt es sich nach Definition nicht mehr um Edge-Computing sondern um Cloud-Computing.

Eine Edge erstmalig aufzusetzen und in die Thematik zu finden ist sehr zeitintensiv und sollte in Form einer Schulung oder Workshops zukünftigen Studenten nähergebracht werden.

4.3 Ausblick Forcam Edge

Für den Fall, dass die Edge auf dem Computer des PTZ betrieben werden soll, sind alle nötigen Hardware- und Softwarevorkehrungen getroffen. Dadurch können zukünftige Studenten direkt mit der Einrichtung der Verbindung beginnen. Im weiteren Verlauf, wenn Produktionsdaten gesammelt werden, können auch KI-Algorithmen dazu verwendet werden, um das System weiter zu verbessern. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass eine eigene Visualisierung für die Daten, die über die Edge laufen, aufgesetzt wird.

Für den Falls, dass die Edge auf einem Server läuft, können keine Aussagen zu Hardware- und Softwarestand getroffen werden. Dennoch ist es möglich die gleichen Erweiterungen zu etablieren, wie bei der Computer-Variante.

Eine Schulung, Workshop oder eine Begleitperson sind essenziell, um einen Einstieg in die Thematik zu ermöglichen.

5. Ergebnisse und Validierung

Im Zuge der Bearbeitung wurden mehr Aufgaben bearbeitet, als gefordert waren. Diese hatte damit zu tun, dass Instandhaltungsmaßnahmen, sowie kleine Umbauten nötig waren. Diese Aufgaben hätten bei einem anderem Team gelegen, wurden aber vom SPS-Team bearbeitet. Grund hierfür waren, dass die Probleme und Umbauten meist innerhalb eines Tages abgearbeitet werden konnten.

Das Kapitel 3. Weiterentwicklung der SPS-Architektur zeigt genau, welche Ergebnisse im Rahmen der SPS erzielt wurden.

Weitere Ergebnisse sind:

- Hinzufügen und Umplatzieren von optischen Sensoren, um dem neuen Konzept gerecht zu werden.
- Tausch eines Umlegers, aus Verschleißgründen.
- Tausch mehrerer Ventile, aus Verschleißgründen.
- Installation der Edge auf dem Rechner im PTZ.
- Anbindung aller Teilnehmer der Anlage an die SPS.
- Datenübertragung an das Peakboard.
- Entfernen des grünen Knopfs am Handarbeitsplatz.

Sämtliche Ergebnisse wurden intensiv getestet und es konnte ein reibungsloser Produktionsbetrieb ermöglicht werden. Die erfolgreichen Montage- und Demontageprozesse wurden abschließend vor einem Komitee der DHBW präsentiert und abgenommen.

5.1 Funktionsprüfung der SPS-Architektur

Die Funktionsprüfung der SPS-Architektur erfolgte ähnlich einer echten Inbetriebnahme. Das Konzept wurde in das Programm eingearbeitet und anschließend getestet. Danach wurden notwendige Änderungen im Programm vorgenommen, um eine störungsfreie Produktion zu ermöglichen. In manchen Bereichen war eine Anpassung des Konzepts nötig, um das Programm zu vereinfachen oder eine Realisierung zu ermöglichen.

Zunächst wurde die Synchronität hinzugefügt – Alle Stopper schalten gleichzeitig und nur, wenn jede Station fertig ist.

Jede Station musste neu programmiert werden. Zunächst wurde das Programm erstellt und alle Stationen überbrückt, dass sie sich dauerhaft im Status fertig befinden, außer die Station, die in dem Moment bearbeitet wurde. So konnte intensiv an der Stelle der aktuellen Bearbeitung getestet und die Fehler erkannt werden.

Um Fehler zu minimieren, die mit leeren Magazinen einherführen, wurde Software hinzugefügt, die die Magazine mitzählt und Warnungen und Fehler ausgibt, wenn Magazine voll bzw. leer sind.

5.2 Funktionstests der Auftragsabwicklung

Die Funktionstests der Auftragsabwicklung konnten nur begrenzt durchgeführt werden, da das MES-System im Zeitraum der Bearbeitung nicht einsatzfähig war. Es wurde eine Auftragsverwaltung etabliert, die über das HMI gesteuert werden kann. Siehe Kapitel 3.2.

Das Programm wurde so vorbereitet, dass eine einfach Umstellung der Auftragsverwaltung vom HMI auf das MES-System möglich ist. Ein abzuarbeitender Auftrag enthält die Informationen über Montage- oder Demontageprozess, sowie die die Stückzahl, die bearbeitet werden soll.

Ein Auftrag, der über das HMI erstellt wird, wird anschließend von der SPS bearbeitet. Es ist nur möglich, einen Auftrag auf einmal zu bearbeiten. Der Auftrag muss abgeschlossen sein, bevor ein neuer Auftrag gestartet werden kann.

Der Funktionstest der Auftragsabwicklung ist gleich zu setzen mit einer voll funktionsfähigen Anlage, da hierfür alle Stationen funktionieren müssen.

5.3 Bewertung der Verbesserungen

Nach dem Konzeptentwurf Ende des Jahres 2024, bei dem die Stationen und die Aufgaben der Stationen genau definiert wurden, galt es diese im Jahr 2025 umzusetzen. Hierfür musste fast das gesamte SPS-Programm neu geschrieben werden und Lösungen für tiefgreifende Probleme gefunden werden.

Es existieren zwei große Verbesserungen. Die Umstellung auf einen Synchronbetrieb und die dadurch notwendige Abkapselung jeder Station.

Bei dem vorherigen Ansatz hat jede Station für sich selbst gearbeitet und direkt nach Absolvierung ihrer Aufgabe das Bauteil weitergeschickt. Dadurch, dass einige Stationen länger brauchen als Andere, kam es zu Staus, was ab fünf Bauteilen an einer Stationen, zu Verzahnungen kam, die die Anlage selbstständig nicht lösen konnte. Durch die Umstellung wurde die Fehlerrate drastisch gesunken und der Übergang zum Dauerbetrieb war möglich.

Durch die Umstellung war es nötig, alle Stationen so zu programmieren, dass sie auf keine Signale von anderen Stationen angewiesen sind. Dadurch konnten die Stationen in das Prinzip von State Machines überführt werden. Hiermit kennt jede Station nur zwei Zustände. Warten oder Aufgabe bearbeiten. Eine Verschaltung mit anderen Stationen ist nicht mehr nötig. Dadurch wird das SPS-Programm bedeutend vereinfacht, strukturierter und übersichtlicher. Es konnte ein System etabliert werden, welches eine solide Basis bietet, auf dem weiter aufgebaut werden kann.

Die Verbesserungen haben zu einem fehlerfreien Betrieb geführt.

6. Fazit und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit konnten alle Meilensteine erreicht werden, was zu dem Ergebnis einer produktionsfähigen Anlage geführt hat. Das ausgearbeitete Konzept wurde dahingehend erweitert und verfeinert, dass die Stationen alle selbstständig arbeiten und nicht mehr voneinander abhängig sind. Hierbei war die Umstellung auf den synchronisierten Betrieb eine Vereinfachung, die Struktur, Modularität und Erweiterbarkeit ermöglicht.

Nahezu das gesamte SPS-Programm wurde neu geschrieben und auskommentiert. Dadurch ist die Bearbeitung durch nachfolgende Programmierer bedeutend vereinfacht worden. Es wurden kleine Hardwareanpassung bei den Sensoren vorgenommen, damit die Stationen genormt und sicher funktionieren. Weiterhin waren diverse Reparaturmaßnahmen notwendig, vor allem im Bereich der Umleger. Es konnten alle Teilnehmer, wie Wenglor- und IFM-Kameras, Sensoren und Aktoren fehlerfrei in das System integriert werden. Es wurde eine Auftragsverwaltung etabliert, die so ausgelegt ist, dass die Steuerung über das HMI mit wenig Aufwand auf das MES bzw. die Edge umgestellt werden kann. Die Edge wurde erfolgreich installiert und bereitgestellt.

Es konnten Fähigkeiten, die in der Theorie des Studiums erworben wurden in der Praxis umgesetzt werden. Hierzu zählen die Programmierung von Anlagen mittels TIA Portal, der Umgang mit Netzwerken und Verbindungen, der Umgang mit einarmigen Robotern, Problemerkennung und die Erarbeitung von Lösungen als Einzelperson und im Team.

Alle Maßnahmen haben dazu geführt, dass aus einer Anlage, deren Stationen nur teilweise oder gar nicht funktionierten, ein produktionsfähiges Gesamtprodukt wurde, das so ausgearbeitet ist, dass zukünftige Jahrgänge gut darauf aufbauen können.

Für die Zukunft bleiben noch viele Möglichkeiten die Anlage in ihrer Gesamtheit zu erweitern und auszubauen. Die Implementierung des MES-Systems und der Edge sind die nächsten Punkte, um eine externe Auftragsverwaltung zu realisieren. Hierbei kann die Edge dahingehend erweitert werden, dass mittels KI die Sensordaten überwacht werden und ein Frühwarnsystem etabliert wird. Weiterhin kann die Taktung der einzelnen Stationen erhöht

werden, um den Durchsatz zu erhöhen. Das SPS-Programm kann dahin erweitert werden, dass beim Auslaufen eines Auftrags in den höheren Stationen in den unteren Stationen ein neuer Auftrag begonnen werden kann. Die Ausarbeitung und die Integration des Handarbeitsplatzes an die SPS sind ebenfalls Aufgaben, die noch zu bearbeiten sind. Die Anlage ist funktionsfähig und voll einsatzbereit, hat ihr volles Potential aber noch nicht ausgeschöpft.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SPS, MES und Data Connection [51] 1
Abbildung 2: Historische Entwicklung Industrie 4.0 [7] 3
Abbildung 3: Automatisierungspyramide [12] 7
Abbildung 4: Sensorik und Aktorik [16] 10
Abbildung 5: Programmablauf und Zykluszeit [27] 16
Abbildung 6: Das EVA-Prinzip am Beispiel SPS 17
Abbildung 7: Schematische Aufbau von EDGE CONNECT [46] 27
Abbildung 8: HMI Auftragsmaske 31
Abbildung 9: Auftragsverwaltung FB 31
Abbildung 10: Stopper_Controller FB 32
Abbildung 11: Station 1 FB 34
Abbildung 12: Station 3 FB 36
Abbildung 13: Zeiterfassung Handarbeitsplatz 37
Abbildung 14: Station 5 FB 37
Abbildung 15: Qualitätskriterien zusammenführen 39
Abbildung 16: Station 5 FB 40
Abbildung 17: Station 6 Qualitätsdaten übernehmen 41
Abbildung 18: Station 6 Beispiel Ansteuerung 42
Abbildung 19: Station 6 FB 43
Abbildung 20: HMI Magazine Anzeige/Quittieren 45
Abbildung 21: Hyper-V-Manager 47
Abbildung 22: Installationsanleitung Forcam 47
Abbildung 23: Installationsanleitung Forcam 48
Abbildung 24: Netzwerkkonfiguration der Edge 49

8. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABB.	Abbildung
ADS	Automation Device Specification (Beckhoff-spezifisch)
AWL	Anweisungsliste
BDE	Betriebsdatenerfassung
CPU	Central Processing Unit (Zentraleinheit)
DB	Datenbaustein
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
DNC	Distributed Numerical Control
EDGE	Datenverarbeitung am Netzwerkrand (Edge Computing)
ERP	Enterprise Resource Planning
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
FB	Funktionsbaustein
FC	Funktion
FOCE	Forcam Edge Connect (Softwarekomponente von Forcam)
FUP	Funktionsplan
HMI	Human Machine Interface
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
I/O	Input/Output (Ein-/Ausgabe)
iDB	Instanzdatenbaustein
IFM	IFM Electronic GmbH (Sensorik- und Automatisierungstechnik)
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
ISA-95	Industriestandard zur Integration von MES und ERP
IT	Informationstechnologie

Abkürzung	Bedeutung
JSON	JavaScript Object Notation
KI	Künstliche Intelligenz
KOP	Kontaktplan
MDE	Maschinendatenerfassung
MDC	Machine Data Collection
MES	Manufacturing Execution System
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NATS.io	Netzwerk-Messaging-System (Cloud-native Kommunikationsplattform)
OB	Organisationsbaustein
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OT	Operational Technology
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller (engl. für SPS)
PROFIBUS	Process Field Bus – Serielles Feldbus-System
PROFINET	Prozessfeldnetz – Ethernet-basiertes Feldbus-System
PTZ	Produktionstechnisches Zentrum
REST	Representational State Transfer
REST API	RESTful Application Programming Interface
RTU	Remote Terminal Unit (Modbus RTU)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCL	Structured Control Language
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ST	Structured Text
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TIA	Totally Integrated Automation

Abkürzung	Bedeutung
TSN	Time-Sensitive Networking
VM	Virtuelle Maschine
WENG-LOR	Wenglor Sensoric GmbH (Sensorhersteller)

9. Literaturverzeichnis

[1] M. t. H. B. V.-H. Thomas Bauernhansl, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[2] T. Schmertosch, Automatisierung 4.0: Technologien und Anwendungen für die intelligente Fabrik, 1. Auflage, Springer Vieweg, 2021.

[3] T. Bauernhansel, Handbuch Industrie 4.0, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2020.

[4] F. &. ENISCO, „Connect all machines and increase effectiveness and sustainability," 17. 09. 2024. [Online]. Available: https://forcam-enisco.net/en/blog/sap-dm-and-edge-connect/. [Zugriff am 28. 04. 2025].

[5] W. W. a. J. H. H. Kagermann, „Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sicher - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht," acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Frankfurt/Main, 2013.

[6] Bundesminesterium für Bildung und Forschung, „Industrie 4.0 - Was ist Industrie 4.0?," [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html. [Zugriff am 13. 05. 2025].

[7] inray Industriesoftware GmbH, „inray - Der Weg von Industrie 1.0 nach Industrie 4.0," 06. 08. 2021. [Online]. Available: http://inray.de/aktuelles/der-weg-von-industrie-1-0-nach-industrie-4-0. [Zugriff am 29. 04. 2025].

[8] K. Schwab, The Fourth Industrial Revolution, New York: Crown Business, 2016.

[9] N. F. M. K. u. M. R. M. Brettel, „How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 perspective", *International Journal of Information and Communication Engineering," Nr. vol. 8, no. 1, 2014.

[10] U. Sendler, Industrie 4.0 grenzenlos, München: Springer Vieweg, 2016.

[11] S. Strahringer, „Industrie 5.0– Die ganzheitliche Idee einer menschlicheren, nachhaltigeren und widerstandsfähigeren Industrie oder ein Sammelbecken für dies und das?," in *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Springer, 2023, p. S. 1111–1114.

[12] IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover , „IPH - Automatisierungspyramide: Aufbau und Bedeutung," 2022. [Online]. Available: https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/automatisierungstechnik/automatisierungspyramide/. [Zugriff am 29. 04. 2025].

[13] P. L. u. M. G. B. Heinrich, Grundlagen Automatisierung: Erfassen – Steuern – Regeln, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.

[14] ATR Software GmbH, „Von der Automatisierungpyramide zu vernetzten Prozessen," [Online]. Available: https://www.atr-software.de/von-der-automatisierungspyramide-zu-vernetzten-prozessen/?cookie-state-change=1747132456429. [Zugriff am 13. 05. 2025].

[15] SAP, „Was ist ein MES (Manufacturing Execution System)?," [Online]. Available: https://www.sap.com/germany/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html#:~:text=Deutschland-,Was%20ist%20ein%20MES%20(Manufacturing%20Execution%20System)%3F,Rohmaterial%20bis%20zum%20fertigen%20Produkt. [Zugriff am 13. 05. 2025].

[16] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, „Intelligente Sensorik und Aktorik für cyber-physische Systeme (CPS)," 2025. [Online]. Available: https://www.wirtschaft-digital-bw.de/aktuelles/news/detailseite/intelligente-sensorik-und-aktorik-fuer-cyber-physische-systeme-cps#:~:text=Intelligente%20Sensorik%20und%20Aktorik%20sind,und%20Anforderungen%20aus%20allen%20Branchen.. [Zugriff am 29. 04. 2025].

[17] Institut WV, „Mess- und Sensortechnik 2022/2023," 2022. [Online]. Available: https://institut-wv.de/wp-content/uploads/sites/9/2022/11/096-671_Mess-_und_Sensortechnik_22_23.pdf. [Zugriff am 6. 5. 2025].

[18] ifm electronic gmbh, „ifm Produkte," [Online]. Available: https://www.ifm.com/de/de/product/EVC431. [Zugriff am 28. 12. 2024].

[19] A. Czechowicz, Aktoren und Sensoren für mechatronische Systeme, Bochum: Springer Vieweg, 2025.

[20] „Lexikon der Physik - Aktor," Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, 1998.

[21] KUKA AG, „Robotersysteme von KUKA," [Online]. Available: https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme. [Zugriff am 13. 05. 2025].

[22] ZVEI, „Fachverbandsbroschüre Automation," 2020. [Online]. Available: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2020/September/Fachverbandsbroschuere_Automation/Brosch_FV_Automation_2020_ONLINE.pdf. [Zugriff am 5. 6. 2025].

[23] VDE, STEP7 Crashkurs, VDE VERLAG GmbH, 2005.

[24] K. Juschkat, „Elektrotechnik Automatisierung - Was ist eine SPS? Definition, Grundlagen und Funktion," Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 30. 07. 2024. [Online]. Available: https://www.elektrotechnik.vogel.de/was-ist-eine-sps-definition-grundlagen-und-funktion-a-ac7e836b2194b3cac340ceddf92838d8/. [Zugriff am 15. 05. 2025].

[25] G. Wellenreuther, D. Zastrow, K. John und M. Tiegelkamp, Automatisieren mit SPS - Theorie und Praxis, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.

[26] M. T. Karl Heinz John, SPS-Programmierung mit IEC 61131-3, Berlin: Springer-Verlag, 2009.

[27] SolisPLC, „The Complete Practical Guide to Siemens Tia Portal Programming," [Online]. Available: https://www.solisplc.com/tutorials/a-practical-guide-to-siemens-tia-portal-programming. [Zugriff am 15. 05. 2025].

[28] B. W. Gerhard Schnell, Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik -- Grundlagen, Systeme und Anwendungen der instustriellen Kommunikation, Stuttgart/ Mannheim: Springer Vieweg, 2018.

[29] TeDo Verlag GmbH, „SPS Magazin - Profinet, Powerlink oder Ethercat? Industrial Ethernet-Busse für komplexe Antriebsaufgaben," 19. 05. 2009. [Online]. Available: https://www.sps-magazin.de/allgemein/profinet-powerlink-oder-ethercat-industrial-ethernet-busse-fuer-komplexe-antriebsaufgaben/. [Zugriff am 07. 05. 2025].

[30] EtherCAT Technology Group, „EtherCAT - Technology Overview,“ [Online]. Available: https://www.ethercat.org/default.htm. [Zugriff am 07. 05. 2025].

[31] OPC Foundation, „OPC - What is OPC?,“ 2025. [Online]. Available: https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/. [Zugriff am 07. 05. 2025].

[32] MQTT, „MQTT: The Standard for IoT Messaging,“ 2024. [Online]. Available: https://mqtt.org/. [Zugriff am 07. 05. 2025].

[33] Phoenix Contact Deutschland GmbH, „Phoenix Contact - Time-Sensitive Networking (TSN),“ 2025. [Online]. Available: https://www.phoenixcontact.com/de-de/technologien/kommunikationstechnologien/tsn#:~:text=Time%2DSensitive%20Networking%20ist%20ein,Standardisierungsorganisation%20IEEE%20802.1%20definiert%20werden.. [Zugriff am 07. 05. 2025].

[34] SAP, „Was ist ein MES (Manufacturing Execution System)?,“ [Online]. Available: https://www.sap.com/germany/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html#:~:text=Ein%20Manufacturing%20Execution%20System%20(MES)%20ist%20ein%20umfassendes%2C%20dynamisches,%2C%20verfolgt%2C%20dokumentiert%20und%20steuert.. [Zugriff am 13. 05. 2025].

[35] J. Kletti, MES – Manufacturing Execution System: Grundlagen, Funktionen, Nutzen und Einführung, Mosbach: Springer Vieweg, 2022.

[36] F. E. GmbH, „Forcam ENISCO - Smart Factory Lösungen,“ [Online]. Available: https://forcam-enisco.net/uebersicht-sap-dm/. [Zugriff am 15. 05. 2025].

[37] J. Schreiner, „Was bedeutet Edge Computing?,“ 25 01 2019. [Online]. Available: https://www.industry-of-things.de/wasbedeutet-edge-computing-a-678225/. [Zugriff am 08 07 2025].

[38] Alexander Thamm GmbH, „Brownfield vs. Greenfield - Jedes Unternehmen kann Teil der Industrie 4.0 werden,“ 04 11 2020. [Online]. Available: https://www.alexanderthamm.com/de/blog/industrie-4-0-greenfield-vs-brownfield-jede-fabrik-und-jedes-unternehmen-kann-teil-der-industrie-4-0-werden/?utm_source=chatgpt.com. [Zugriff am 08 07 2025].

[39] A. J. ferrer, Beyond Edge Computing, Barcelona, Spanien: Springer, 2023.

[40] Penguin Solutions, „Necessary Requirements, Advantages, and Disadvantages of using Edge Computing in the Manufacturing Industry Explained," 2025. [Online]. Available: https://www.penguinsolutions.com/en-us/resources/blog/necessary-requirements-advantages-and-disadvantages-of-using-edge-computing-in-the-manufacturing-industry-explained?utm_source=chatgpt.com. [Zugriff am 08 07 2025].

[41] Otava, „Edge Computing Examples in Manufacturing: How Smart Technology Is Transforming Production," 2025. [Online]. Available: https://www.otava.com/blog/edge-computing-examples-in-manufacturing-how-smart-technology-is-transforming-production/. [Zugriff am 08 07 2025].

[42] Siemens , „Industrial internet of things," 2025. [Online]. Available: https://www.sw.siemens.com/en-US/solutions/industrial-internet-of-things-iiot/?utm_campaign=2024-7-global-di_sw_sd_02_edge_iot_lifecycle_analytics&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=goldfish&utm_term=sea_de&gad_source=1&gad_campaignid=2181370813. [Zugriff am 08 07 2025].

[43] Beckhoff, „TwinCAT-Lösungen für IoT und Industrie 4.0," 2025. [Online]. Available: https://www.beckhoff.com/de-de/produkte/automation/twincat-3-fuer-industrie-4.0/. [Zugriff am 08 07 2025].

[44] Bosch Rexroth, „ctrlX CORE," 2025. [Online]. Available: https://apps.boschrexroth.com/microsites/ctrlx-automation/en/portfolio/ctrlx-core/. [Zugriff am 08 07 2025].

[45] Phoenix Contact, „PLCnext Technology," 2025. [Online]. Available: https://www.phoenixcontact.com/de-de/produkte/plcnext-technology. [Zugriff am 08 07 2025].

[46] FORCAM GmbH, FORCE EDGE CONNECT, Deutschland: FORCAM, 2024.

[47] A. Hanser, „SPS," Friedrichshafen, 2024.

[48] D. Weberbauer, *Auszug aus dem TIA Portal von Siemens,* Friedrichshafen, 2024.

[49] D. Weberbauer, *Auszug aus Programmierung eines UR.*

[50] Siemens AG, „SiePortal,“ 27. 02. 2024. [Online]. Available: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109744319/change-ip-address-and-profinet-device-name-during-operation?dti=0&lc=en-DE.

[51] n.a., „PowerPoint Präsentation SPS, MES und Data Connection,“ n.a., Friedrichshafen, n.a..

[52] e.V., PROFIBUS Nutzerorganisation, „PROFINET - Technology Descriptiom,“ [Online]. Available: https://www.profinet.com/profinet-explained/technology-description. [Zugriff am 12. 1. 2025].

[53] DriveCon GmbH, „DriveCon Lexikon - Profibus,“ [Online]. Available: https://www.drivecon.de/de/lexikon/profibus. [Zugriff am 12. 1. 2025].