Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

DHBW
Duale Hochschule
Baden-Württemberg
Ravensburg
Campus Friedrichshafen

Implementierung eines MES-Systems in die Zukunftsfabrik Bodensee

Auftragssteuerung und Auftragsverwaltung durch das MES

Studienarbeit T3_3200

Studiengang Elektrotechnik

Studienrichtung Automatisierungstechnik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg, Campus Friedrichshafen

von

Tom Gluth, Edgar Malinowsky

Abgabedatum:	10. Juli 2026
Bearbeitungszeitraum:	07.04.2026 - 13.07.2026
Matrikelnummer:	7773289, 5538376
Kurs:	TEA23
Dualer Partner:	DHBW Ravensburg - PTZ - Zukunftsfabrik Bodensee
Betreuer:	Thomas Dietmüller

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Erklärung

gemäß Ziffer 1.1.14 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 24.07.2023.

Wir versichern hiermit, dass wir unsere Studienarbeit T3_3200 mit dem Thema:

Implementierung eines MES-Systems in die Zukunftsfabrik Bodensee

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

Ingelheim am Rhein, den 10. Juli 2026

Signiert von: Tom Gluth 52515B8FD3BF49E...

DocuSigned by: Edgar Malinowsky A20E6F6131AD4A2...

Tom Gluth, Edgar Malinowsky

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Kurzfassung

Die Studienarbeit befasst sich mit der konzeptionellen Implementierung eines Manufacturing Execution Systems (MES) in der Zukunftsfabrik Bodensee der DHBW Ravensburg. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie Aufträge aus dem MES und aus dem HMI strukturiert an die SPS übergeben und dort eindeutig verarbeitet werden können. Ausgangspunkt ist ein bereits teilweise konfiguriertes FORCAM-MES-System, bei dem die technische Verbindung zur SPS zwar grundsätzlich vorhanden ist, eine durchgängige Auftragsverarbeitung jedoch noch nicht umgesetzt wurde.

Nach einer theoretischen Einordnung von MES, Auftragssteuerung und der Kommunikation zwischen Steuerungsebene und IT-Ebene wird die Architektur von FORCAM FORCE MES FLEX und FORCE EDGE CONNECT analysiert. Darauf aufbauend werden die relevanten Schnittstellen, Datenflüsse und Komponenten für die Auftragsübertragung betrachtet. Im Zentrum der Arbeit steht die Konzeption einer standardisierten Auftragsverwaltung im MES sowie eines SPS-seitigen Auftragsmanagements, das sowohl MES- als auch HMI-Aufträge berücksichtigen kann.

Für die Übertragung der Aufträge werden mögliche Kommunikationswege zwischen MES, Edge Connect und SPS untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Zusätzlich wird ein Handshake-Konzept entwickelt, das eine sichere Übergabe und Bestätigung der Auftragsdaten gewährleistet. Zur Vermeidung von Konflikten bei gleichzeitig vorhandenen Auftragsquellen werden außerdem Priorisierungs- und Scheduling-Ansätze für die SPS diskutiert.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Die Arbeit liefert damit eine strukturierte Grundlage für die spätere technische Umsetzung einer bidirektionalen, wartungsfreundlichen und skalierbaren Schnittstellenarchitektur. Die erarbeiteten Konzepte schaffen die Voraussetzung für eine eindeutige Auftragszuordnung, eine zuverlässige Produktionssteuerung sowie für zukünftige Erweiterungen innerhalb der Lernfabrik.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Abstract

This student research project addresses the conceptual implementation of a Manufacturing Execution System (MES) at the Zukunftsfabrik Bodensee of DHBW Ravensburg. The main focus is on how orders from the MES and from the HMI can be transferred to the PLC in a structured way and processed there without ambiguity. The starting point is a partially configured FORCAM MES system in which the basic PLC connection exists, but a continuous order-processing workflow has not yet been implemented.

After a theoretical classification of MES, production scheduling, and communication between the control level and the IT level, the architecture of FORCAM FORCE MES FLEX and FORCE EDGE CONNECT is analyzed. Based on this, the relevant interfaces, data flows, and components for order transfer are examined. The core of the work is the design of a standardized order management concept in the MES and a PLC-side order management strategy that can handle both MES-based and HMI-based orders.

Possible communication paths between MES, Edge Connect, and the PLC are evaluated with regard to their suitability for transferring orders. In addition, a handshake concept is developed to ensure secure transfer and confirmation of order data. To avoid conflicts when multiple order sources are active at the same time, prioritization and scheduling approaches for the PLC are also discussed.

The work therefore provides a structured foundation for the later technical implementation of a bidirectional, maintainable, and scalable interface architecture. The

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

developed concepts form the basis for clear order assignment, reliable production control, and future extensions within the learning factory.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen **3**

2.1 Grundlagen des Manufacturing Execution Systems (MES) 3

2.1.1 Begriff, Zielsetzung und Einordnung 3

2.1.2 Normative Rahmenwerke und Standardisierung 4

2.1.3 Grundlegende Aufgaben und Funktionsweise 6

2.1.4 Zentrale Funktionsmodule eines MES 7

2.1.5 Abgrenzung zu verwandten Systemen 9

2.1.6 Zusammenfassung 9

2.2 Auftragssteuerung und Scheduling 10

2.2.1 Grundbegriffe der Reihenfolgeplanung 10

2.2.2 Prioritätsregeln als Entscheidungsgrundlage 10

2.2.3 Digitale Feinplanung in MES-Systemen 11

2.3 Kommunikation zwischen Steuerungs- und IT-Ebene 12

2.3.1 Handshaking-Verfahren 12

2.3.2 Distributed Numerical Control und NC-Skripting 13

2.3.3 Signalnormierung mittels DACQ-Skripten 14

2.4 Ausgangslage 14

3 Systemanalyse des FORCAM MES mit Fokus auf EDGE CONNECT und FORCE MES FLEX **16**

3.1 Systemarchitektur und Komponentenaufbau 16

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

3.2 Komponente FORCE EDGE CONNECT 18
3.2.1 Aufgaben und Rolle im Gesamtsystem 18
3.2.2 Edge-Knoten und Konfigurationskonzept 19
3.2.3 Maschinenanbindung und Protokolle 19
3.2.4 EDGE API und Eventmodell 20
3.2.5 Northbound- und Southbound-Kommunikation für Auftragsdaten 20
3.2.6 Handshake-Mechanismen zwischen SPS und EDGE CONNECT 21
3.3 Komponente FORCE MES FLEX 22
3.3.1 Rolle als MES- und Bedienplattform 22
3.3.2 Bedienoberflächen und Dashboards 23
3.3.3 Integrierte MES-Apps 23
3.3.4 Auftragsverwaltung und Bridge API in FORCE MES FLEX 24
3.4 Zusammenspiel von EDGE CONNECT und FORCE MES FLEX . 25
3.4.1 Datenfluss vom Shopfloor zur MES-Ebene 25
3.4.2 Bidirektionale Kommunikation 26
3.4.3 Mehrquellen-Auftragsmanagement und Feinplanung 26

4 Vorgehen 28
4.1 Systemanalyse 28
4.2 Zieldefinition 28
4.3 Schnittstellenkonzeption 29
4.4 Konzeption der Umsetzung 29

5 Konzeptionierung 31
5.1 Übertragungsmöglichkeiten von Aufträgen an die SPS 31
5.1.1 DCU-Kommunikation 32
5.1.2 Edge Connect-Kommunikation 32
5.1.3 Möglicher Handshake zwischen SPS und Edge Connect . . . 33
5.2 Auftragsmanagement in der SPS 34
5.2.1 Notwendigkeit des Auftragsmanagements 34
5.2.2 Möglichkeiten des Auftragsmanagements 35
5.2.2.1 Priorisierung 35

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

5.2.2.2 Scheduling 36
5.2.2.3 Abwägung der Möglichkeiten 39
5.2.3 Weitere zu berücksichtigende Aspekte 39

6 Zusammenfassung und Ausblick **41**
6.1 Zusammenfassung 41
6.2 Ausblick 42

Literaturverzeichnis **44**

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen **48**

Abbildungsverzeichnis **51**

Tabellenverzeichnis **52**

A Anmerkung zur Nutzung von Künstlicher Intelligenz **I**

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

1 Einleitung

Die zunehmende Digitalisierung industrieller Fertigungsprozesse im Kontext von Industrie 4.0 stellt Unternehmen vor die Aufgabe, Produktionsabläufe durchgängig transparent, flexibel und effizient zu gestalten. Manufacturing Execution Systems (MES) übernehmen dabei die Vermittlung zwischen der betriebswirtschaftlichen Planungsebene und der operativen Steuerungsebene und schaffen die Voraussetzung, Produktionsdaten in Echtzeit auszuwerten und gezielt für die Fertigungssteuerung zu nutzen.

Diese Studienarbeit beschäftigt sich mit der konzeptionellen Implementierung eines MES-Systems in die Zukunftsfabrik Bodensee der DHBW Ravensburg mit dem Schwerpunkt auf Auftragssteuerung und Auftragsverwaltung. Ziel ist es, zu untersuchen, wie Aufträge aus dem MES strukturiert an die SPS übergeben und dort eindeutig verarbeitet werden können, insbesondere wenn zusätzlich Aufträge direkt über das HMI erzeugt werden.

Ausgangspunkt der Arbeit ist ein bereits teilweise vorbereitetes FORCAM-MES-System mit FORCAM FORCE MES FLEX und FORCAM FORCE EDGE CONNECT, bei dem eine grundlegende Verbindung zur SPS vorhanden war. Zu Beginn des Bearbeitungszeitraums kam es zu Lizenzierungsproblemen auf den Servern, die bis Berabeitungsschluss der Studienarbeit nicht behoben werden konnten. Daher konnte die geplante Umsetzung nicht praktisch durchgeführt werden; stattdessen wurden die notwendigen Schnittstellen, Abläufe und Lösungsansätze konzeptionell ausgearbeitet.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Vor diesem Hintergrund werden zunächst die Grundlagen zu MES, Auftragssteuerung und Kommunikation zwischen Steuerungs- und IT-Ebene dargestellt. Anschließend erfolgt eine Analyse der Systemarchitektur von EDGE CONNECT und MES FLEX, bevor mögliche Kommunikationswege, ein Handshake-Konzept sowie Strategien für ein SPS-seitiges Auftragsmanagement entwickelt werden. Damit schafft die Arbeit eine belastbare Grundlage für eine spätere technische Umsetzung in der Lernfabrik.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen des Manufacturing Execution Systems (MES)

2.1.1 Begriff, Zielsetzung und Einordnung

Ein *Manufacturing Execution System (MES)* begleitet die Ausführung von Fertigungsaufträgen in Echtzeit, überwacht deren Fortschritt und greift bei Abweichungen korrigierend ein.[1], [2], [3] Innerhalb der Automatisierungspyramide vermittelt es dabei zwischen der betriebswirtschaftlichen Planungsebene eines Enterprise-Resource-Planning-Systems (ERP) und der technischen Steuerungsebene aus Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und Prozessleitsystemen wie SCADA.[1], [4], [5]

Charakteristisch für ein MES ist der geschlossene Regelkreis: Eine bestehende, freigegebene Produktionsplanung wird nicht nur durchgesetzt (*Execution*), sondern laufend mit Rückmeldungen aus der Fertigung abgeglichen.[1], [6] Erst durch diese kontinuierliche Erfassung und Verarbeitung von Echtzeitdaten entsteht die Transparenz, die reaktionsschnelle Entscheidungen im laufenden Prozess überhaupt erst ermöglicht.[1], [7] Vereinfacht lässt sich der Unterschied zum ERP so zusammenfassen: Das ERP klärt *was* und *wann* produziert werden soll, während das MES beantwortet, *wie* und mit welchem aktuellen Status die Produktion tatsächlich

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

abläuft.[2], [4]

2.1.2 Normative Rahmenwerke und Standardisierung

VDI-Richtlinie 5600

Um MES-Lösungen unterschiedlicher Hersteller inhaltlich vergleichbar zu machen, hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) mit der Richtlinie VDI 5600 einen Funktionskatalog geschaffen, der sich in zehn Aufgabenfelder gliedert.[8] Diese lassen sich zu vier thematischen Gruppen bündeln:

- **Auftrags- und Ressourcenbezug:** Auftragsmanagement, Feinplanung/-steuerung und Betriebsmittelmanagement legen fest, welcher Auftrag mit welchen Ressourcen zu welchem Zeitpunkt bearbeitet wird.

- **Material und Personal:** Material- und Personalmanagement stellen sicher, dass Werkstoffe sowie qualifizierte Mitarbeiter am Bedarfsort verfügbar sind.

- **Daten und Information:** Datenerfassung und Informationsmanagement bilden die technische Grundlage für alle weiteren Auswertungen.

- **Bewertung und Nachhaltigkeit:** Leistungsanalyse, Qualitätsmanagement und Energiemanagement liefern die Kennzahlen für eine kontinuierliche Prozessverbesserung.

Über den reinen Funktionsumfang hinaus konkretisiert die ergänzende Richtlinie VDI 5600 Blatt 8 zudem, wie die dafür notwendigen Schnittstellen und Datenmodelle zwischen MES und angrenzenden Systemen ausgestaltet sein sollten.[9] Diese Schnittstellenperspektive greift Abschnitt 2.3 später wieder auf.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

MESA International

Im englischen Raum hat sich stattdessen das Modell der *Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA)* etabliert, das bereits 1997 elf MES-Kernfunktionen definierte:[1], [10]

1. Ressourcenzuweisung und -status (*Resource Allocation and Status*)
2. Arbeitsgänge/Detailplanung (*Operations/Detail Scheduling*)
3. Disposition von Produktionseinheiten (*Dispatching Production Units*)
4. Dokumentenkontrolle (*Document Control*)
5. Datenerfassung und -bereitstellung (*Data Collection/Acquisition*)
6. Personalmanagement (*Labor Management*)
7. Qualitätsmanagement (*Quality Management*)
8. Prozessmanagement (*Process Management*)
9. Instandhaltungsmanagement (*Maintenance Management*)
10. Leistungsanalyse (*Performance Analysis*)
11. Produktverfolgung und -genealogie (*Product Tracking and Genealogy*)

Bemerkenswert ist, dass MESA mit *Operations/Detail Scheduling* bereits 1997 explizit eine Reihenfolgeplanungsfunktion als eigenständigen Kernbereich auswies - ein Konzept, das in Abschnitt 2.2 vertieft wird.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

2.1.3 Grundlegende Aufgaben und Funktionsweise

Kernaufgaben im Produktionsprozess

Auch losgelöst von den beiden Referenzmodellen lassen sich die operativen Aufgaben eines MES auf drei wiederkehrende Kernfunktionen verdichten:[1], [5]

- **Betriebsdatenerfassung (BDE):** systematische Erfassung von Durchlaufzeiten, Maschinenauslastung, Kapazitäten und Verfügbarkeiten.
- **Verriegelung (*Locking*):** Prüfung, ob eine Maschine korrekt eingerichtet und freigegeben ist, bevor ein Auftrag startet (z. B. Freigabeprüfungen, Prüfmittelstatus).
- **Rückverfolgbarkeit (*Traceability*):** lückenlose Dokumentation von Chargen, Seriennummern, Materialeinsatz und Prozessparametern.

Funktionale Wirkungsweise im Gesamtsystem

Ein MES fungiert dabei als fortlaufend aktualisierte Informationsdrehscheibe der Fertigung.[1], [6] Der zugehörige Workflow wiederholt sich typischerweise zyklisch:

1. Das ERP-System erzeugt einen Fertigungsauftrag und gibt ihn zur Produktion frei.
2. Das MES verfeinert den Auftrag - beispielsweise durch Aufspaltung in Teilaufträge - und erstellt daraus eine Feinplanung.
3. Maschinen und Mitarbeiter liefern fortlaufend Ist-Daten (Stückzahlen, Stillstandszeiten, Qualitätswerte).

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

4. Das MES wertet diese Daten in Echtzeit aus, erkennt Abweichungen und stößt bei Bedarf Anpassungen an.

5. Kennzahlen und Ergebnisse werden an übergeordnete Systeme zurückgemeldet.

2.1.4 Zentrale Funktionsmodule eines MES

Produktionsplanung und -steuerung

Basierend auf aktuellen Kapazitäten, Materialverfügbarkeit, Rüstzuständen und Prioritäten bestimmt das MES eine Abarbeitungsreihenfolge, die Rüstzeiten minimiert und Durchlaufzeiten optimiert.[1], [11] Die Auftragssteuerung stellt dabei sicher, dass Material, Werkzeuge und qualifiziertes Personal zur richtigen Zeit an der richtigen Station bereitstehen.[4], [5] Wie eine solche Reihenfolgebildung im Detail erfolgt, ist Gegenstand von Abschnitt 2.2.

Echtzeit-Datenerfassung und -verarbeitung

Die Datenerfassung eines MES speist sich typischerweise aus zwei Kanälen:[1], [2]

- **Maschinendatenerfassung (MDE):** automatische Erfassung von Zuständen, Zählwerten und Prozessgrößen über industrielle Kommunikationsprotokolle (z. B. OPC UA, MQTT, Profinet).

- **Betriebsdatenerfassung (BDE):** manuelle Eingaben an Terminals, Tablets oder BDE-Stationen (z. B. Start/Ende von Aufträgen, Störgründe, Qualitätsurteile).

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Beide Datenströme werden im MES konsolidiert und mit den laufenden Aufträgen korreliert, wodurch Abweichungen und Engpässe unmittelbar sichtbar werden.[11], [12]

Qualitätsmanagement und Rückverfolgbarkeit

Weil die Qualitätskontrolle in Echtzeit erfolgt, kann bei Abweichungen sofort reagiert werden, etwa durch Sperren betroffener Chargen.[2], [4] Die damit einhergehende, lückenlose Produktgenealogie - wer hat wann, wo und unter welchen Bedingungen welches Material verarbeitet - ist insbesondere in regulierten Branchen wie der Lebensmittel-, Pharma- oder Automobilindustrie unerlässlich.[1], [5]

Ressourcenmanagement

Maschinen, Personal, Werkzeuge und Materialien werden vom MES integriert geplant, um kurze Durchlaufzeiten, hohe Auslastung und Termintreue zu erreichen.[1], [5] Da dabei auch Mitarbeiterqualifikationen und Wartungsfenster berücksichtigt werden, unterstützt das MES sowohl die operative Steuerung als auch mittelfristige Kapazitätsentscheidungen.[6], [11]

Leistungsanalyse und Kennzahlen

Kennzahlen wie die Overall Equipment Effectiveness (OEE), Stillstandszeiten, Ausschussquoten und Termintreue erlauben es, Schwachstellen entlang der Wertschöpfungskette zu identifizieren und in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) zu adressieren.[1], [5] Über Dashboards lassen sich diese Kennzahlen auf unterschiedlichen Aggregationsstufen - Schicht, Linie, Werk - zielgruppengerecht darstellen.[2], [4]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

2.1.5 Abgrenzung zu verwandten Systemen

MES im Vergleich zu ERP-Systemen

ERP-Systeme planen auf Tages- bis Wochenbasis strategisch-taktische Fragen wie Absatz- oder Materialbedarfsplanung, während das MES mit Echtzeitdaten im Sekunden- bis Stundenbereich die konkrete Ausführung der Fertigung begleitet.[4], [12] Beide Ebenen sollten über geeignete Schnittstellen bidirektional verbunden sein, damit Planung und Ausführung konsistent bleiben.[1], [2]

MES im Vergleich zu SCADA-Systemen

SCADA-Systeme visualisieren und überwachen einzelne Anlagen auf Feldebene und sind eng mit der Maschinensteuerung verzahnt.[1], [6] Das MES setzt eine Ebene darüber an: Es orchestriert mehrere Maschinen, Anlagen oder ganze Produktionslinien aus Sicht des Auftrags, nicht aus Sicht des einzelnen Aggregats.[1], [4]

2.1.6 Zusammenfassung

Ein MES verbindet die planerische ERP-Ebene mit der technischen Steuerungsebene und lässt sich anhand der Referenzmodelle VDI 5600 und MESA in klar abgegrenzte Funktionsbereiche gliedern.[1], [2], [4], [8], [10] Ein vertiefender Überblick über den gesamten MES-Themenkomplex findet sich zudem im MES-Kompendium von Kletti.[13] Zwei Aspekte, die im ursprünglichen Funktionskatalog bereits angelegt, aber noch nicht vertieft wurden, greifen die folgenden Abschnitte auf: die Bildung von Auftragsreihenfolgen (Abschnitt 2.2) sowie die technische Kommunikation zwischen SPS und übergeordneten Systemen (Abschnitt 2.3).

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

2.2 Auftragssteuerung und Scheduling

2.2.1 Grundbegriffe der Reihenfolgeplanung

Konkurrieren mehrere Fertigungsaufträge um dieselbe Ressource, entsteht eine Warteschlange, deren Abarbeitungsreihenfolge nicht beliebig sein darf. Diese Aufgabe wird als **Reihenfolgeplanung** (englisch *Scheduling*) bezeichnet und zielt darauf ab, eine Bearbeitungsfolge mit minimalen Durchlauf- und Leerzeiten zu bestimmen.[14] Da sich ein exaktes, allgemeingültiges Lösungsverfahren in der Praxis meist nicht wirtschaftlich berechnen lässt, kommen überwiegend heuristische Verfahren zum Einsatz.[14]

Dabei wird zwischen *statischen* Verfahren, bei denen die Reihenfolge aller anstehenden Aufträge einmalig im Voraus festgelegt wird, und *dynamischen* Verfahren unterschieden, bei denen die Entscheidung erst unmittelbar beim Freiwerden einer Ressource getroffen wird. Dynamische Verfahren können dadurch flexibel auf neu eintreffende, unter Umständen dringende Aufträge reagieren - eine Eigenschaft, die relevant wird, sobald Aufträge aus unterschiedlichen Quellen mit unterschiedlicher Priorität eintreffen.

2.2.2 Prioritätsregeln als Entscheidungsgrundlage

Um die Reihenfolgeentscheidung nicht manuell treffen zu müssen, werden in der Praxis **Prioritätsregeln** eingesetzt: Jedem wartenden Auftrag wird anhand eines festgelegten Kriteriums eine Prioritätskennzahl zugewiesen, nach der die Abarbeitung erfolgt.[15] Zu den bekanntesten elementaren Regeln zählen unter anderem:[16]

- **First-Come-First-Served (FCFS):** Der zuerst eingetroffene Auftrag wird zuerst bearbeitet.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

- **Kürzeste-Operationszeit-Regel (SPT):** Aufträge mit der kürzesten verbleibenden Bearbeitungszeit werden bevorzugt, um die durchschnittliche Durchlaufzeit zu senken.

- **Frühester-Liefertermin-Regel (EDD):** Der Auftrag mit dem nächstliegenden Endtermin erhält die höchste Priorität.

- **Schlupfzeitregel:** Priorisiert wird der Auftrag, bei dem die Differenz zwischen verbleibender Zeit bis zum Liefertermin und verbleibender Bearbeitungszeit am geringsten ist.

Da einzelne Regeln jeweils nur ein Ziel gut erfüllen - etwa kurze Durchlaufzeiten *oder* hohe Termintreue -, kommen in der Praxis häufig **kombinierte Prioritätsregeln** zum Einsatz, die mehrere Kriterien verknüpfen, um die Schwächen einzelner Regeln auszugleichen.[15]

2.2.3 Digitale Feinplanung in MES-Systemen

Innerhalb eines MES wird die Reihenfolgeplanung als **Feinplanung** operationalisiert: Im Gegensatz zur langfristigen Grobplanung des ERP betrachtet sie einen Zeithorizont von Stunden bis wenigen Tagen und berücksichtigt konkrete Ressourcenverfügbarkeiten wie Maschinenzustände, Personalqualifikationen und Materialbestände.[17]

Moderne MES-Plattformen bilden diese Aufgabe in eigenen Apps ab. Die Anwendung *Schedule4SF* von FORCAM ENISCO importiert beispielsweise Aufträge, Ecktermine und Prioritäten aus dem ERP-System und erstellt daraus über einen prioritätsgesteuerten Algorithmus automatisiert einen Produktionsplan unter Berücksichtigung von Personal- und Maschinenverfügbarkeit.[17] Ein solcher Algorithmus setzt die zuvor beschriebenen Prioritätsregeln unmittelbar in eine ausführbare Planungslogik um und zeigt beispielhaft, wie Scheduling-Konzepte

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

praktisch in einer MES-Umgebung Anwendung finden.

2.3 Kommunikation zwischen Steuerungs- und IT-Ebene

Damit Auftragsdaten, Maschinenzustände und Prozessparameter zuverlässig zwischen SPS und übergeordneten IT-Systemen ausgetauscht werden können - eine Anforderung, die bereits VDI 5600 Blatt 8 mit Blick auf Schnittstellen und Datenmodelle adressiert[9] -, sind je nach Anwendungsfall unterschiedliche Kommunikationsmechanismen erforderlich.

2.3.1 Handshaking-Verfahren

Als **Handshake** beziehungsweise **Handshaking** wird ein Kommunikationsverfahren bezeichnet, bei dem sich zwei Systeme gegenseitig ihre Bereitschaft zum Datenaustausch bestätigen, bevor die eigentlichen Nutzdaten übertragen werden.[18] Ziel ist ein geordneter Datenaustausch, der Datenverlust oder Fehlinterpretationen vermeidet, wie sie entstehen könnten, wenn eine Seite sendet, während die andere noch nicht empfangsbereit ist.[18]

In der Automatisierungstechnik wird zwischen *Hardware-Handshaking* und *Software-Handshaking* unterschieden. Bei seriellen Schnittstellen wie RS232 oder RS485 signalisieren dedizierte Leitungen wie RTS (Request to Send) und CTS (Clear to Send) die Sende- beziehungsweise Empfangsbereitschaft, während softwareseitige Verfahren wie XON/XOFF dieselbe Funktion über reservierte Steuerzeichen im Datenstrom abbilden.[19] In der SPS-Programmierung wird eine vergleichbare Logik häufig zwischen einer Steuerung und einem Peripheriegerät implementiert, um Pufferüberläufe zu vermeiden und den Datenaustausch zu koordinieren.[19]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Dasselbe Prinzip lässt sich auf die Übergabe von Aufträgen zwischen zwei übergeordneten Systemen übertragen: Die anfragende Seite signalisiert ihre Anfrage, die empfangende Seite bestätigt deren Verarbeitung, und erst nach dieser wechselseitigen Bestätigung gilt der Übergabevorgang als abgeschlossen.

2.3.2 Distributed Numerical Control und NC-Skripting

Sollen nicht nur Zustände und Zählwerte, sondern vollständige Bearbeitungsprogramme zwischen IT-Ebene und Maschinensteuerung ausgetauscht werden, kommt das Konzept der **Distributed Numerical Control (DNC)** zum Tragen: ein computergestütztes Verfahren, mit dem NC-Programme für CNC-Maschinen zentral über einen Server verwaltet und bei Bedarf direkt in die jeweilige Maschinensteuerung geladen werden, anstatt sie - wie in älteren Konzepten üblich - über Lochstreifen oder Wechseldatenträger zu verteilen.[20] Neben der reinen Übertragung übernimmt eine DNC-Lösung auch die revisionssichere Dokumentation jeder Programmübertragung, was insbesondere in Branchen mit hohen Rückverfolgbarkeitsanforderungen von Bedeutung ist.[20]

Edge-Plattformen wie FORCE EDGE CONNECT integrieren diese Funktionalität über eine eigene DNC-Steuerung, die im Einrichtungsdialog einer Maschine unabhängig von der reinen Signalerfassung (MDC-Steuerung) konfiguriert wird.[21] Der Begriff **NC-Skripting** bezeichnet in diesem Kontext die Konfiguration der Übertragungslogik: Für jede Steuerungsfamilie wird festgelegt, in welcher Form ein NC-Programm bereitgestellt, angefordert und auf der Maschine abgelegt werden muss.[21] Dadurch lassen sich NC-Programme ebenso wie Auftragsdaten oder Statusmeldungen standardisiert zwischen mehreren, unterschiedlichen Maschinentypen und der übergeordneten MES-Ebene austauschen.[22]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

2.3.3 Signalnormierung mittels DACQ-Skripten

Die eigentliche Erfassung und Aufbereitung von Maschinensignalen erfolgt bei FORCAM-Systemen durch zwei zusammenwirkende Funktionsmodule, die beide auf der zentralen Hardwareschnittstelle zwischen Fertigung und übergeordnetem System - dem sogenannten Edge Gateway - laufen: die **Data Collection Unit (DCU)** und die **Data Acquisition (DACQ)**.[23] Während die DCU für die reine, kanalbezogene Signalaufnahme zuständig ist, übernimmt das DACQ-Modul deren inhaltliche Interpretation.

Diese Interpretation wird über sogenannte **DACQ-Skripte** realisiert: kleine, in einer vereinfachten Skriptsprache verfasste Logikbausteine, die aus einer oder mehreren Signalkombinationen ein standardisiertes Zustands- oder Produktionsereignis ableiten - etwa die Meldung *Produktion* aus der Kombination mehrerer Bit-Signale einer älteren Steuerung ohne eigenen strukturierten Status.[22] Damit leisten DACQ-Skripte einen wesentlichen Beitrag zur sogenannten Brownfield-Integration, da sich auch Bestandsanlagen ohne moderne, standardisierte Schnittstelle über wenige, einfache Signale in ein einheitliches Datenmodell überführen lassen.[22] Neben der reinen Ableitung von Ereignissen können DACQ-Skripte darüber hinaus auch in die umgekehrte Richtung wirken, indem sie auf empfangene Ereignisse reagieren und Werte zurück in die Maschinensteuerung schreiben - eine Voraussetzung für die in Kapitel 5 Konzeptionierung beschriebene bidirektionale Auftragsübergabe.[22]

2.4 Ausgangslage

Zu Beginn diesen Teils der Studienarbeit war das MES bereits einsatzfähig und hat Daten aus der Maschine auswerten können. Die Schnittstellen von der SPS zum MES über die Edge Connect war bereits eingerichtet. Durch ein Problem an der Server-Infrastruktur konnte dann aber das Projekt nicht in der Realität umgesetzt

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

werden, weshalb in den folgenden Abschnitten nur die Konzepte dargestellt werden können.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

3 Systemanalyse des FORCAM MES mit Fokus auf EDGE CONNECT und FORCE MES FLEX

3.1 Systemarchitektur und Komponentenaufbau

Die MES-Landschaft von FORCAM setzt auf ein zweistufiges Architekturprinzip: Die Konnektivitätsplattform *FORCE EDGE CONNECT* übernimmt die Maschinendatenerfassung und -anbindung, während das eigentliche Manufacturing Execution System *FORCE MES FLEX* für Verarbeitung, Visualisierung und Bedienung zuständig ist.[24], [25], [26], [27] Beide Komponenten sind bewusst lose gekoppelt und kommunizieren über klar definierte Schnittstellen, was einer komponierbaren IT-Infrastruktur entspricht: Maschinenanbindung und MES-Funktionalität lassen sich dadurch unabhängig voneinander skalieren und weiterentwickeln.[24], [28]

Diese Trennung ist auch für die in Abschnitt 3.2.5 und Abschnitt 3.3.4 betrachteten Auftragsflüsse maßgeblich, da Auftragsdaten grundsätzlich in MES FLEX entstehen bzw. verwaltet werden, aber über EDGE CONNECT den Weg zur Steuerungsebene finden müssen. Im ZDP ist die Systemarchitektur, wie in Abb. 3.1 dargestellt, realisiert: Ein zentraler Server bündelt mehrere lokale virtuelle Ma-

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

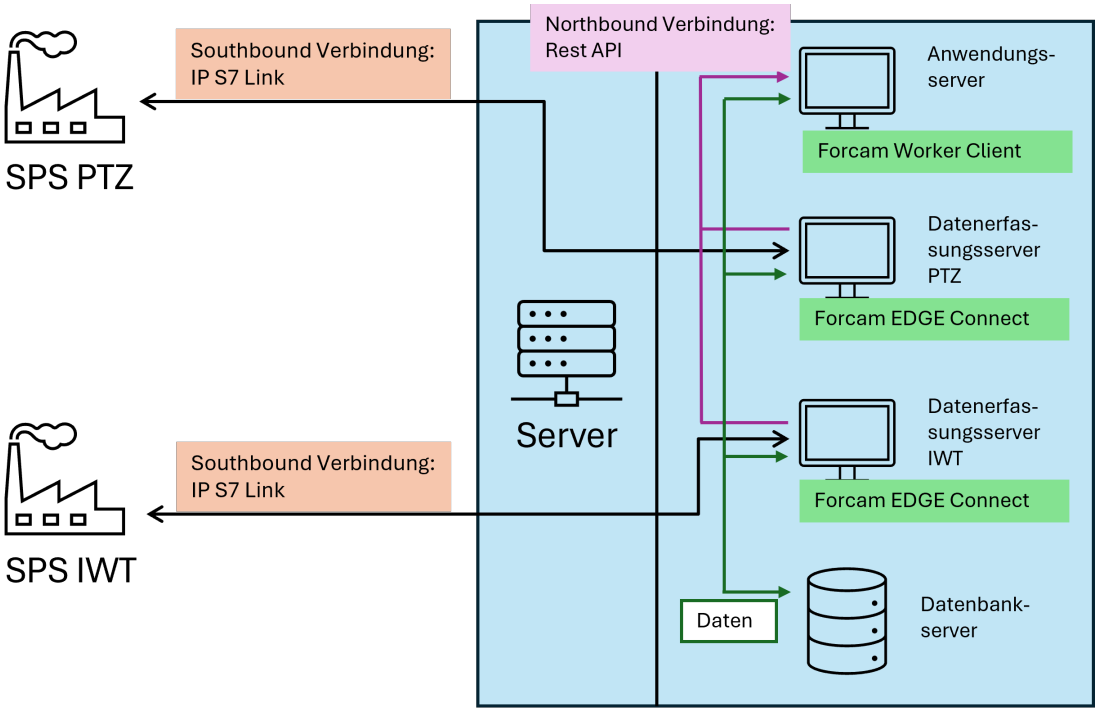


Abbildung 3.1: Übersicht Netzwerk-Infrastrukur im ZDP

schinen (VMs), die jeweils eine der im Folgenden beschriebenen Komponenten betreiben.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

3.2 Komponente FORCE EDGE CONNECT

3.2.1 Aufgaben und Rolle im Gesamtsystem

FORCE EDGE CONNECT bildet die Datenerfassungsschicht zwischen Shopfloor und den darüberliegenden IT-Systemen und ist damit die zentrale Anlaufstelle für die Anbindung heterogener Maschinenparks.[26], [27] Maschinensignale und Prozessdaten werden in Echtzeit erfasst, in ein einheitliches Datenmodell überführt und als standardisierte Events an nachgelagerte Systeme wie FORCE MES FLEX oder SAP Digital Manufacturing weitergereicht.[26], [29]

Zu den Kernaufgaben zählen dabei insbesondere:

- die Erfassung von Zuständen, Zählwerten und Prozessgrößen direkt aus Steuerungen und Sensorik,
- die Normalisierung dieser Rohsignale zu standardisierten Status- und Produktionsereignissen sowie
- die Bereitstellung einer bidirektionalen Kommunikationsschnittstelle zwischen Maschine und IT-Ebene.

[26], [27]

Gerade der letzte Punkt - die bidirektionale Schnittstelle - ist Ausgangspunkt für die in Abschnitt 3.2.5 und Abschnitt 3.2.6 vertiefte Analyse der Auftragsübertragung an die SPS.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

3.2.2 Edge-Knoten und Konfigurationskonzept

Technisch folgt EDGE CONNECT einem Knotenmodell: Ein Edge-Knoten bildet jeweils eine logisch abgegrenzte Anbindungsinstanz - etwa für ein Werk oder einen Linienverbund -, wobei pro Standort mehrere Knoten zur Lastverteilung oder zur Berücksichtigung von Netzsegmentgrenzen betrieben werden können.[26]

Verwaltet wird dieses Knotenmodell über eine zentrale, webbasierte Oberfläche (EDGE Configuration), die unter anderem

- eine Übersicht aller Knoten samt Statusinformationen,
- die Anzahl und den Verbindungsstatus angebundener Maschinen sowie
- die zentrale Aktivierung, Deaktivierung und Überwachung der Konnektivität

bereitstellt.[26] Die eigentliche Anbindung einer Maschine erfolgt in einem geführten, mehrstufigen Dialog, in dem neben Steuerungstyp, Signalen und Logikskripten bei Bedarf auch die NC-Programmübertragung konfiguriert wird.[26]

3.2.3 Maschinenanbindung und Protokolle

Um sowohl moderne als auch ältere Maschinen integrieren zu können, unterstützt EDGE CONNECT eine breite Palette an Steuerungen und Protokollen.[26], [27] In der Praxis kommen dabei vor allem folgende Mechanismen zum Einsatz:

- steuerungsspezifische Plug-ins, beispielsweise für Siemens S7, Beckhoff oder Heidenhain,
- industrielle Kommunikationsprotokolle wie OPC UA, MQTT, Profinet oder MTConnect sowie

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

- zusätzliche IO-Module oder Sensorik zur nachträglichen Digitalisierung von Bestandsanlagen.

[26], [30]

Die auf diesem Weg erfassten Signale werden über konfigurierbare Logik - die sogenannten Composition- bzw. DACQ-Skripte, siehe hierzu auch Abschnitt 2.3.3 im Grundlagenkapitel - in standardisierte Ereignisse wie Produktionsstart, Störung oder Mengenrückmeldung überführt und an die MES-Ebene weitergeleitet.[22], [26]

3.2.4 EDGE API und Eventmodell

Für den Datenaustausch mit Drittsystemen stellt EDGE CONNECT eine HTTP- bzw. REST-basierte API bereit, über die Events im JSON-Format übertragen werden.[26] Das zugrunde liegende Eventmodell erlaubt Platzhalter für dynamische Werte, sodass Maschinensignale zur Laufzeit direkt in den Eventinhalt eingebettet werden können.[26] Über dieses API-Konzept lassen sich neben FORCE MES FLEX grundsätzlich auch weitere Systeme - etwa Datenplattformen, Analytics-Lösungen oder cloudbasierte Services - anbinden.[27]

3.2.5 Northbound- und Southbound-Kommunikation für Auftragsdaten

Die bisher beschriebene REST-API von EDGE CONNECT ist zunächst auf die sogenannte *Northbound-Richtung* ausgelegt: Ereignisse fließen von der Maschine über EDGE CONNECT zur MES-Ebene. Für die in Kapitel 5 Konzeptionierung zu konzipierende Übertragung von Aufträgen an die SPS ist jedoch die entgegengesetzte, *Southbound* genannte Richtung maßgeblich.[22], [29] EDGE CONNECT

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

sieht hierfür grundsätzlich zwei Wege vor, die sich aus der Systemanalyse als mögliche Übertragungsoptionen ableiten lassen:

- **Signalbasierte Übertragung:** Auftragsbezogene Werte (z. B. Auftragsnummer, Produktvariante, Sollmenge) werden als einzelne Signale über die Composition-Skripte in Steuerungsvariablen der SPS geschrieben.[22]

- **Programmbasierte Übertragung:** Ganze Bearbeitungsprogramme werden im Sinne einer Distributed Numerical Control (DNC) über die DNC-Steuerung von EDGE CONNECT an die Maschine übertragen.[20], [26]

Beide Optionen sind nicht exklusiv: Während die signalbasierte Übertragung sich für kompakte Auftragskopfdaten eignet, kommt die programmbasierte Übertragung dort zum Tragen, wo der Auftrag zugleich ein spezifisches NC-Programm für die Bearbeitung vorgibt.

Durch eine Einschränkung bei der Verwendung von FORCAM FORCE MES können aber keine DNC-Controller eingestellt werden, da FORCE MES direkt eigene DACQ-Skripte weitergibt.[31, S. 84]

3.2.6 Handshake-Mechanismen zwischen SPS und EDGE CONNECT

Damit eine southbound übertragene Auftragsvorgabe von der SPS auch zuverlässig übernommen wird, reicht die reine Signalübertragung allein nicht aus - es bedarf eines Bestätigungsmechanismus im Sinne des in Abschnitt 2.3.1 des Grundlagenkapitels beschriebenen Handshaking.[18] Aus der Systemanalyse ergeben sich für die Kombination aus SPS und EDGE CONNECT grundsätzlich zwei technisch mögliche Umsetzungsvarianten:

- **Bit-basiertes Anfrage-/Bestätigungssignal:** EDGE CONNECT setzt

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

ein *Request*-Bit, sobald neue Auftragsdaten in die SPS geschrieben wurden; die SPS quittiert die Übernahme durch ein eigenes *Acknowledge*-Bit, das ein Composition-Skript auswertet, bevor das Request-Bit zurückgesetzt wird.[19], [22]

- **Ereignisbasierte Bestätigung über die EDGE API:** Alternativ kann die SPS die erfolgreiche Übernahme eines Auftrags als eigenes, strukturiertes Ereignis an EDGE CONNECT zurückmelden, das wiederum über die REST-API an FORCE MES FLEX weitergereicht wird.[26], [29]

Beide Varianten setzen voraus, dass die Composition-Skripte nicht nur - wie in Abschnitt 2.3.3 des Grundlagenkapitels beschrieben - Ereignisse aus Signalen ableiten, sondern auch in umgekehrter Richtung auf Ereignisse reagieren und Werte in die Steuerung zurückschreiben können.[22] Welche der beiden Varianten für den konkreten Anwendungsfall der Zukunftsfabrik Bodensee die geeignetere ist, wird in Kapitel 5 Konzeptionierung untersucht.

3.3 Komponente FORCE MES FLEX

3.3.1 Rolle als MES- und Bedienplattform

FORCE MES FLEX bildet die eigentliche MES-Ebene der Lösung: eine flexible Datendrehscheibe, die zugleich als zentrale Bedien- und Visualisierungsplattform dient.[24], [25] Die von EDGE CONNECT gelieferten Events werden hier Aufträgen, Ressourcen und Materialbewegungen zugeordnet und in Form von MES-Apps und Dashboards bereitgestellt.[25]

Dabei adressiert die Plattform unterschiedliche Nutzergruppen gleichermaßen:

- Werker am Shopfloor über fokussierte, aufgabenorientierte Terminals,

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

- Schicht- und Produktionsleitung über Linien- und Bereichsübersichten sowie
- das Management über aggregierte Kennzahlen und Trendanalysen.

[25], [32]

3.3.2 Bedienoberflächen und Dashboards

Im Kern von FORCE MES FLEX stehen konfigurierbare, rollenbasierte Dashboards, die relevante Informationen in Echtzeit visualisieren und - da als Webanwendung realisiert - auf unterschiedlichsten Endgeräten vom Touch-Terminal bis zum Büroarbeitsplatz nutzbar sind.[25], [32]

Speziell für manuelle Arbeitsplätze stehen zudem Shopfloor-Terminals bereit, die unter anderem

- die Anmeldung von Mitarbeitern und deren Zuordnung zu Maschinen oder Aufträgen,
- das Starten und Beenden von Aufträgen samt Erfassung von Stückzahlen und Störgründen sowie
- die Anzeige von Arbeitsanweisungen, Stücklisten und Qualitätsvorgaben

unterstützen.[32]

3.3.3 Integrierte MES-Apps

Je nach Projektfokus lassen sich in FORCE MES FLEX unterschiedliche MES-Apps aktivieren und konfigurieren.[24], [25] Zu den typischen Anwendungen zäh-

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

len:

- *Leistungsanalyse:* Auswertung von OEE, Stillstandszeiten und Produktivitätskennzahlen.

- *Feinplanung:* Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 des Grundlagenkapitels dargestellt, importiert die App *Schedule4SF* Aufträge und Prioritäten aus dem ERP und erstellt daraus automatisiert einen ressourcenscharfen Produktionsplan mit interaktiven Planungstafeln.[17], [25]

- *Rückverfolgbarkeit:* Track-and-Trace-Funktionalitäten für Chargen und Seriennummern.

- *Dokumentenmanagement:* Bereitstellung und Versionierung von Dokumenten am Arbeitsplatz.

- *Energiemonitoring:* Kombination energetischer und produktiver Kennzahlen.

[25]

3.3.4 Auftragsverwaltung und Bridge API in FORCE MES FLEX

Bevor ein Auftrag über EDGE CONNECT an die SPS gelangen kann, muss er zunächst innerhalb von FORCE MES FLEX angelegt und mit den notwendigen Kopfdaten - etwa Auftragsnummer, Produktvariante und Sollmenge - versehen werden. FORCE MES FLEX stellt hierfür zwei grundsätzliche Wege bereit:

- **Manuelle Auftragsanlage:** Aufträge werden direkt über die Bedienoberfläche von MES FLEX, etwa über eine digitale Plantafel, erfasst und den relevanten Ressourcen zugeordnet.[17], [25]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

- **Automatisierter Import über offene Schnittstellen:** Über die *Bridge API* lassen sich Drittsysteme - etwa ein vorgelagertes ERP-System - anbinden, sodass Auftragsdaten, Ecktermine und Prioritäten automatisiert in MES FLEX übernommen werden können.[24], [25]

Unabhängig vom gewählten Weg der Auftragsanlage steht am Ende dieses Schritts ein vollständig konfigurierter Auftragsdatensatz in MES FLEX, der anschließend - wie in Abschnitt 3.2.5 beschrieben - über EDGE CONNECT an die SPS weitergereicht werden kann. Die konkrete Konfiguration dieses Auftrags für die Zukunftsfabrik Bodensee wird in Kapitel 5 Konzeptionierung vorgenommen.

3.4 Zusammenspiel von EDGE CONNECT und FORCE MES FLEX

3.4.1 Datenfluss vom Shopfloor zur MES-Ebene

Im Zusammenspiel übernimmt EDGE CONNECT die Datenerfassungsschicht, während FORCE MES FLEX für Verarbeitung und Visualisierung zuständig ist.[25], [26] Der Datenfluss folgt dabei einem festen Schema:

1. EDGE CONNECT liest Maschinensignale aus und erzeugt daraus standardisierte Events.

2. Diese Events werden über definierte Schnittstellen an FORCE MES FLEX übertragen.

3. MES FLEX ordnet die Events Aufträgen, Ressourcen und Materialflüssen zu und speichert sie in der MES-Datenbasis.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

4. Die aufbereiteten Informationen werden in Dashboards, Terminals und Reports visualisiert.

[25], [26]

3.4.2 Bidirektionale Kommunikation

Über die reine Datenerfassung hinaus unterstützt das Zusammenspiel aus EDGE CONNECT und MES FLEX auch bidirektionale Kommunikationsszenarien.[27], [29] Dazu zählen insbesondere:

- die Übergabe von Auftragsdaten aus MES FLEX über EDGE CONNECT an Maschinensteuerungen,
- die Verteilung und Bereitstellung von NC-Programmen im Sinne der in Abschnitt 2.3.2 des Grundlagenkapitels beschriebenen DNC-Funktionalität[20] sowie
- die Rückspielung von Vorgabezeiten oder Parameteränderungen aus dem MES an die Steuerung.

[26], [29]

3.4.3 Mehrquellen-Auftragsmanagement und Feinplanung

Aus der bisherigen Analyse ergibt sich, dass Aufträge grundsätzlich aus zwei Quellen an der SPS ankommen können: zum einen als über MES FLEX konfigurierte und via EDGE CONNECT übertragene Aufträge, zum anderen als direkt am HMI der Anlage erstellte Aufträge, die den in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Weg über die MES-Ebene gar nicht durchlaufen. Sobald beide Auftragsquellen gleichzeitig

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

aktiv sein können, stellt sich - unabhängig von der gewählten Übertragungs- und Handshake-Variante - die Frage der Reihenfolgebehandlung, wie sie bereits allgemein in Abschnitt 2.2 des Grundlagenkapitels als Scheduling bzw. Feinplanung eingeführt wurde.

FORCAM adressiert diese Fragestellung auf MES-Ebene bereits mit den Feinplanungs-Apps *Schedule4SF* und *DS4EX*, die Ressourcenverfügbarkeit und Prioritäten automatisiert in eine Abarbeitungsreihenfolge überführen.[17] Diese Feinplanung entfaltet ihre Wirkung jedoch nur für Aufträge, die den MES-Weg tatsächlich durchlaufen; für den in dieser Arbeit relevanten Sonderfall paralleler HMI- und MES-Aufträge auf derselben Anlage ist zusätzlich eine Priorisierungs- oder Scheduling-Logik auf SPS-Ebene erforderlich, die in Kapitel 5 Konzeptionierung konzipiert wird.[16]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

4 Vorgehen

Dieses Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen der Arbeit. Es gliedert sich in vier Phasen: Systemanalyse, Zieldefinition, Schnittstellenkonzeption und konzeptionelle Ausarbeitung.

4.1 Systemanalyse

Ausgangspunkt der Arbeit ist die Analyse des FORCAM MES, wie sie in Kapitel 3 dargestellt wird. Im Mittelpunkt stehen dabei die Komponenten EDGE CONNECT als Schnittstelle zur SPS sowie MES FLEX als übergeordnete Plattform zur Verwaltung und Darstellung der Produktionsinformationen. Diese Untersuchung bildet die technische Grundlage für die weitere Arbeit, da sie die relevanten Systemkomponenten, Datenflüsse und Kommunikationswege zwischen MES und SPS nachvollziehbar macht.

4.2 Zieldefinition

Auf Basis der Systemanalyse (3) werden die zentralen Ziele der Arbeit festgelegt. Im Fokus steht dabei die Frage, wie Auftragsinformationen aus dem MES an die SPS übertragen und dort in der Anlagenlogik verarbeitet werden können. Dabei

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

sollen sowohl aus dem MES übermittelte Vorgaben als auch lokal am HMI erzeugte Aufträge berücksichtigt werden können (vgl. Kapitel 3.4.3). Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Abgrenzung der Zuständigkeiten zwischen MES und SPS, damit die Kommunikation zwischen beiden Ebenen eindeutig und konsistent erfolgen kann.

4.3 Schnittstellenkonzeption

Für die Umsetzung wird die Schnittstelle zwischen MES und SPS betrachtet und strukturiert ausgearbeitet. Auf Seiten der SPS wird hierfür die Verwendung zentraler Datenbausteine mit offset-basierter Adressierung angestrebt, um eine konsistente Signalzuordnung zu ermöglichen. In EDGE CONNECT werden Signale und Composition-Skripte genutzt, um die vom MES bereitgestellten Informationen in die Datenstrukturen der SPS zu überführen. Die Kommunikation zwischen MES und Edge-Instanz erfolgt dabei über die im System vorgesehenen Mechanismen zur Übertragung definierter Signalpakete und nicht über ein frei konfigurierbares Auftragsmanagement im MES.

4.4 Konzeption der Umsetzung

Die weitere Ausarbeitung erfolgt schrittweise. Zunächst werden die im System vorgesehenen Möglichkeiten betrachtet, wie das MES Informationen an EDGE CONNECT übergeben kann. Anschließend wird untersucht, wie diese Daten von EDGE CONNECT an die SPS weitergeleitet und dort in eine geeignete Struktur überführt werden können. Darauf aufbauend wird die SPS-seitige Logik so betrachtet, dass eine klare Verarbeitung der vom MES kommenden Signale möglich wird. Abschließend wird die technische Lösung konzeptionell zusammengeführt und als Grundlage für die spätere Umsetzung dargestellt.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Da aufgrund von Lizenzproblemen keine vollständige praktische Realisierung möglich war, konnte an dieser Stelle nur eine theoretische Konzeption erarbeitet werden, welche in Kapitel 5 zu finden ist.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

5 Konzeptionierung

In diesem Kapitel erfolgt die Konzeptionierung der in Kapitel 4 beschriebenen Ansätze und der in Kapitel 3 aufgeführten Hintergründe sowie deren strukturierte Darstellung. Es werden mögliche Ansätze zur Realisierung der Schnittstelle zwischen FORCAM Force MES FLEX und der SPS dargestellt, einschließlich der Konfiguration der notwendigen Komponenten und der Datenübertragung. Darüber hinaus wird diskutiert, wie Aufträge sowohl aus dem MES als auch aus dem HMI an die SPS übergeben werden können und wie die Auftragsbearbeitung durch die SPS erfolgen kann.

5.1 Übertragungsmöglichkeiten von Aufträgen an die SPS

Für die Übertragung von Daten aus dem MES an die SPS gibt es unterschiediche Möglichkeiten, wie in Kapitel 2.3 bereits theoretisch dargelegt. Eine Übertragung kann entweder durch die Konfiguration einer DCU-Verbindung (Maschinenkommunikation) im MES erfolgen oder über die Kommunikation mittels Edge Connect an die SPS.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

5.1.1 DCU-Kommunikation

Die DCU-Kommunikation (für Details siehe Kapitel 2.3.2) ist eine direkte Verbindung zwischen dem MES und der SPS, welche die Übertragung von NC-Skripten bzw. DACQ-Skripten ermöglicht. Allerdings ist diese Art der Kommunikation nicht für die Übertragung zu verwenden, solange eine Edge-Connect-Instanz verwendet wird.[31, S. 84]

5.1.2 Edge Connect-Kommunikation

Die Edge Connect-Kommunikation ist eine indirekte Verbindung zwischen dem MES und der SPS, welche die Übertragung von Aufträgen über Edge Connect ermöglicht. Diese Übertragung funktioniert ähnlich zu der Übertragung von Prozessdaten der SPS an das MES, wie in Kapitel 3.2.5 angerissen. Allerdings ist die Übertragung nicht identisch und lässt sich nicht pauschal für alle Anwendungsgebiete identisch verwenden. Diese Kommunitkation ist in drei unterschiedliche Parametergruppen unterteilt, mit welchen jeweils bestimmte Verwendungszwecke adressiert werden können.

- **Übertragung von Prozess- und Referenzparametern:** Diese übertragenen Parameter können in Edge Connect für die Signal-Composition verwendet werden, um die Events mit entsprechenden Paramatern zu vervollständigen.

- **Übertragung von Sinalparametern:** Übertragung von Parametern, welche direkt entsprechenden Signalen des Assets zugewiesen werden können.

- **Übertragung von Dokumenten:** Möglichkeit für die Übertragung von NC-Programmen auf das Asset

[33, S. 53]

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Entsprechend des angestrebten Verwendungszwecks für den betrachteten Anwendungsfall ist die Übertragung von Signalparametern die zu wählende Option, da diese durch Edge Connect direkt an die SPS weitergeleitet werden und dort spezifischen Signalen zugewiesen werden. Eine schematische Darstellung der Kommuniaktion zwischen MES, Edge Connect und SPS kann der Abbildung 5.1 entnommen werden.

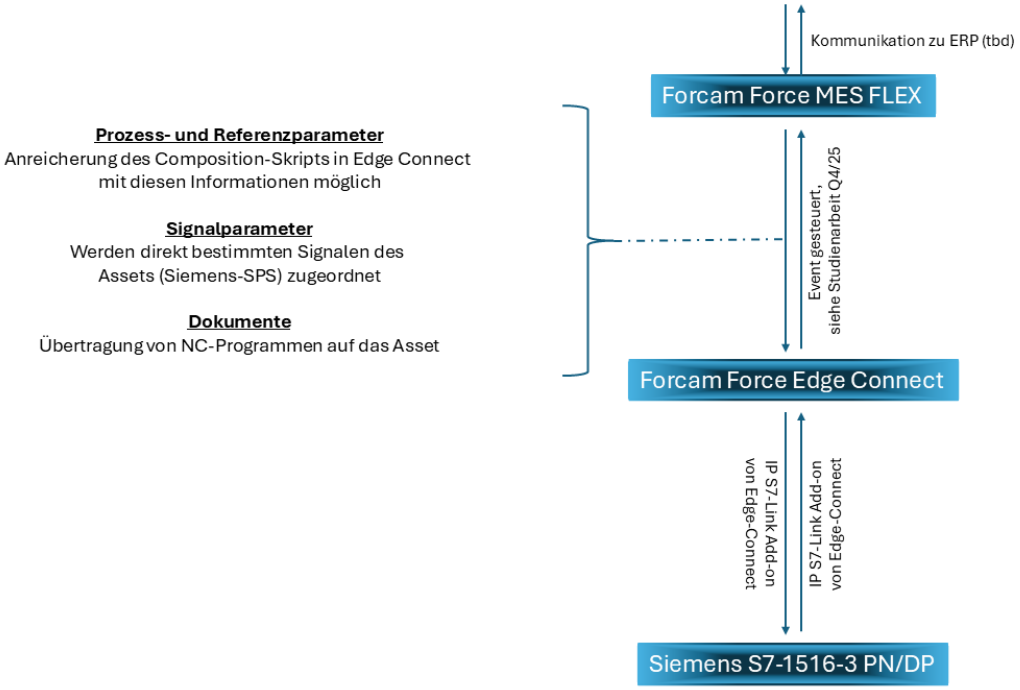


Abbildung 5.1: Kommunikationsschema MES - Edge Connect - SPS

5.1.3 Möglicher Handshake zwischen SPS und Edge Connect

Die Übertragung von Aufträgen aus Edge Connect an die SPS benötigt ein Konzept, welches die Kommunikation zwischen beiden Systemen regelt. Hierfür ist ein

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Handshake (wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben und in 3.2.6 aufgegriffen) zwischen beiden Systemen erforderlich, welcher die Übertragung der Aufträge übernimmt und sicherstellt, dass die Aufträge korrekt an die SPS übergeben werden. Ebenfalls stellt dieser Handshake sicher, dass die SPS die Verarbeitung der Auftragsdaten bestätigt, bevor es zu einer erneuten Datenübertragung kommt, wodurch die Datenintegrität gewährleistet wird. Der Handshake könnte wie in Abbildung 5.2 dargestellt aussehen.

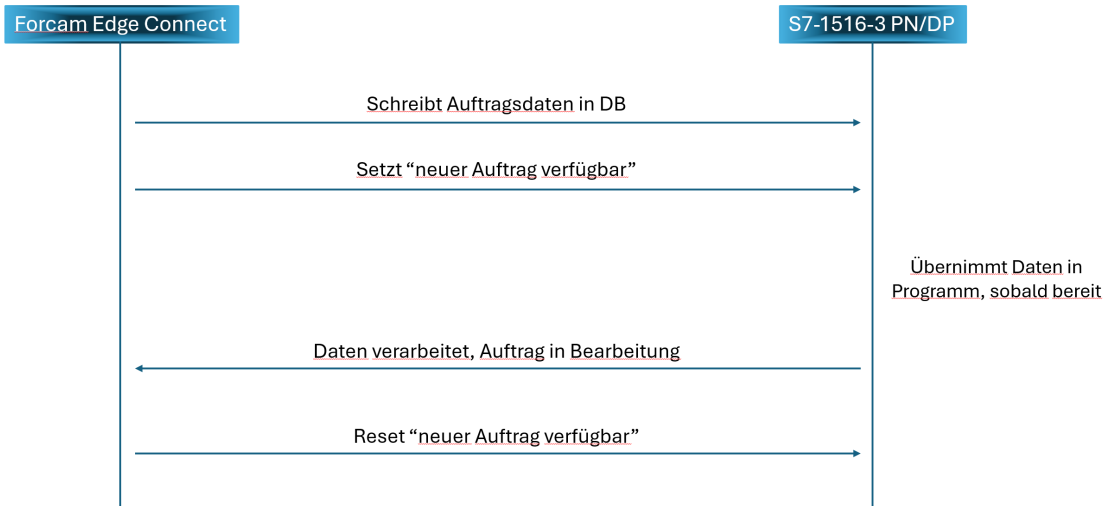


Abbildung 5.2: Handshake SPS-Edge Connect

5.2 Auftragsmanagement in der SPS

5.2.1 Notwendigkeit des Auftragsmanagements

Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten, Aufträge an die SPS zu übergeben, ist ein Auftragsmanagement in der SPS erforderlich. Dieses muss definieren wann Aufträge aus dem MES bearbeitet werden sollen und wann Aufträge, die über das HMI erstellt werden, bearbeitet werden sollen. Dabei muss sichergestellt sein, dass

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

beide der Möglichkeiten funktional korrekt und ohne Konflikte bearbeitet werden können. Ebenfalls sollen bestehende Parameter eines Auftrags, wie etwa die Produktvariante, in beiden Fällen weiterhin berücksichtigt werden und durch die Anlage korrekt umgesetzt werden. Die Quantität der Produkte soll ebenfalls korrekt produziert und gezählt werden, unabhängig davon, ob der Auftrag aus dem MES oder dem HMI stammt. Hierfür ist es notwendig, dass die über Edge/Connect an das MES übermittelten Zählerstände wirklich nur bei aktiv bearbeiteten Aufträgen des MES aktualisiert werden und nicht bei Aufträgen, die über das HMI erstellt wurden. Eine Vermischung mehrerer Aufträge muss vermieden werden, sodass die Anlage weiterhin chargenweise produzieren kann und die Charge eindeutig einem Auftrag zugeordnet werden kann.

5.2.2 Möglichkeiten des Auftragsmanagements

5.2.2.1 Priorisierung

Eine Möglichkeit die oben gennannten Anforderungen zu erfüllen, ist die Priorisierung einer beider Auftragsquellen. Hier wäre es möglich Aufträge, welche aus dem MES stammen, höher zu priorisieren und diese immer zuerst zu bearbeiten.

Damit allerdings weiterhin die Möglichkeit besteht Aufträge über das HMI zu erstellen, ist ein Bypass dieser Priorisierung erforderlich. Dieser Bypass würde beispielsweise über einen Schalter am HMI realisiert werden, welcher die Priorisierung der MES-Aufträge deaktiviert und die Bearbeitung der HMI-Aufträge ermöglicht.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

5.2.2.2 Scheduling

Eine weitere Möglichkeit ist die Implementierung eines Scheduling-Systems, welches die Aufträge aus beiden Quellen in eine gemeinsame Warteschlange einfügt und diese nach einem definierten Algorithmus abarbeitet. Der Scheduler könnte beispielsweise die Aufträge nach Priorität, Ankunftszeit oder Produktionskapazität und -quantität sortieren und so eine gerechte Bearbeitung beider Auftragsquellen gewährleisten. Ein möglicher Scheduler sähe wie folgt aus:

```
1            IF p_Trig_Order OR p_Trig_OrderDone THEN
2                IF b_HMI AND b_MES THEN
3                    IF b_HMI_prio THEN
4                        order := order_HMI;
5                    ELSE
6                        IF t_wait_HMI > t_wait_MES THEN
7                            order := order_HMI;
8                        ELSE
9                            order := order_MES;
10                       END_IF;
11                   END_IF;
12               ELSIF b_HMI THEN
13                   order := order_HMI;
14               ELSIF b_MES THEN
15                   order := order_MES;
16               END_IF;
17           END_IF;
18
```

Listing 5.1: Beispielhafter Scheduler, geschrieben in ST

Hierbei bietet die Variable b_HMI_prio die Möglichkeit der Priorisierung von HMI-Aufträgen. Zusätzlich wird ohne die Priorisierung die Wartezeit der Aufträge berücksichtigt, sodass der Auftrag, welcher bereits länger in der Warteschlange ist, zuerst bearbeitet wird.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Der Zeitverlauf der Auftragsbearbeitung dieses beispielhaften Schedulers ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Andere Scheduler, die beispielsweise die beispielsweise die Dauer des zu produzierenden Auftrags betrachten z. B. anhand der zu produzierenden Menge, oder Scheduler, welche die Aufträge priorisieren, die die frühere Lieferfrist haben, sind an der Stelle auch denkbar.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

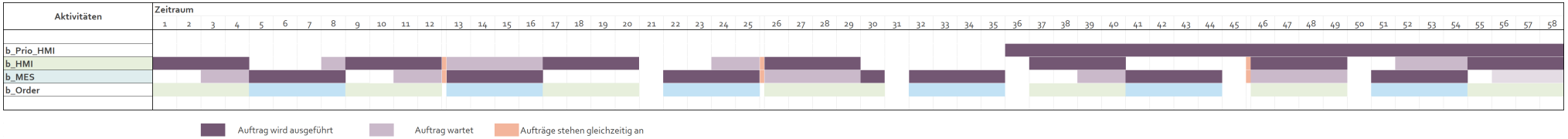


Abbildung 5.3: Gantt-Diagramm Scheduler

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

5.2.2.3 Abwägung der Möglichkeiten

Beide Möglichkeiten haben Vor- und Nachteile. Kommt es beispielsweise bei der Priorisierung dazu, dass der Schalter auf dem HMI-Panel aktiviert wird und durch den Anlagennutzer aus etwaigen Gründen nicht rückgestellt wird, so werden die MES-Aufträge nicht mehr bearbeitet und es kann zu einem Stillstand der Anlage kommen. Werden bei der Lösungsvariante mit dem vorgeschlagenen Scheduler im MES hingegen Aufträge erstellt, während sich die Anlage in einer Downtime befindet, so werden diese Aufträge nach Wiederanlauf der Anlage direkt bearbeitet, solange die Anforderung b_HMI_Prio nicht vor Herunterfahren der Anlage aktiviert wurde und remanent ist.

Für beide Fälle gibt es entsprechende Maßnahmen, um die Risiken zu minimieren. Bei der Priorisierung kann beispielsweise ein Timeout implementiert werden, welches die Priorisierung nach einer definierten Zeit automatisch deaktiviert, sollte der Benutzer dies vergessen haben. Beim Scheduling kann eine Sperrzeit nach Anlagenwiederanlauf für Aufträge aus dem MES implementiert werden, sodass die MES-Aufträge erst nach Ablauf dieser Sperrzeit bearbeitet werden und die Anlage zunächst die HMI-Aufträge abarbeitet.

5.2.3 Weitere zu berücksichtigende Aspekte

Zusätzlich zu den bereits genannten Anforderungen an das Auftragsmanagement und möglicher Umsetzungsmöglichkeiten, sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. Wesentliche Aspekte, welche bisher nicht berücksichtigt sind, ist zum Einen die Möglichkeit Aufträge zu stornieren oder abzubrechen und zum Anderen die Absicherung gegen plötzlich auftretende Ereignisse wie einen Stromausfall bzw. Medienausfall. In solchen Fällen müssen die aktellen Aufträge korrekt gespeichert und nach Wiederanlauf der Anlage wieder aufgenommen werden können, zumal in das MES übertragene Zählerstände nicht verloren gehen und der aktuell bearbeitete Auftrag dadurch nicht einfach neugestartet werden kann. Dies muss von

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

mehreren Perspektiven aus berücksichtigt werden. Das zu implementierende Auftragsmanagement muss entweder in der Lage sein, zwischen Spannungsausfall und gewolltem Herunterfahren der Anlage zu unterscheiden, oder es muss eine Möglichkeit geben, die Auftragsbearbeitung nach einem Spannungsausfall korrekt wieder aufzunehmen und in diesen Fällen die entsprechend zuletzt bearbeitete Charge fortzusetzen. Hierfür sind sowohl entsprechende Vorkehrungen im SPS-Programm zu treffen, als auch im MES/Edge Connect, da beide Systeme ihre eigenen Zählerstände und Auftragsinformationen haben und entsprechend angesteuert werden müssen, um eine korrekte Weiterbearbeitung der Aufträge zu gewährleisten.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studienarbeit wurde die Implementierung eines Manufacturing Execution Systems (MES) in die Zukunftsfabrik Bodensee der DHBW Ravensburg konzeptionell untersucht und strukturiert ausgearbeitet. Ausgangspunkt war ein bereits teilweise konfiguriertes FORCAM Force MES-System, bei dem zwar eine grundlegende Verbindung zwischen SPS und Edge Connect vorhanden war, jedoch noch keine durchgängige und standardisierte Auftragsverarbeitung umgesetzt war.

Zur Bearbeitung dieser Ausgangssituation wurden zunächst die Grundlagen von MES, Auftragssteuerung und der Kommunikation zwischen Steuerungsebene und IT-Ebene erarbeitet. Darauf aufbauend erfolgte eine Analyse der Systemarchitektur von FORCAM Force MES FLEX und FORCE EDGE CONNECT, insbesondere im Hinblick auf die Rollenverteilung zwischen Auftragsverwaltung, Datenerfassung, Eventverarbeitung und Schnittstellenkommunikation.

Im Zentrum der Konzeptionierung stand die Frage, wie Aufträge sowohl aus dem MES als auch aus dem HMI an die SPS übergeben und dort zuverlässig verarbeitet werden können. Hierzu wurden unterschiedliche Kommunikationswege zwischen MES, Edge Connect und SPS betrachtet sowie ein Handshake-Mechanismus und mögliche Strategien für das SPS-seitige Auftragsmanagement ausgearbeitet. Besonders relevant war dabei die Definition einer robusten Struktur zur eindeu-

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

tigen Zuordnung von Aufträgen, Zählerständen und Produktvarianten, um eine Vermischung unterschiedlicher Auftragsquellen zu vermeiden.

Die Arbeit zeigt damit ein belastbares Konzept auf, wie sich eine bidirektionale Verbindung zwischen MES und SPS in der Zukunftsfabrik Bodensee realisieren lässt. Die erarbeiteten Strukturen bilden die Grundlage für eine spätere technische Umsetzung und bieten einen übertragbaren Ansatz für weitere Anlagen und Anwendungsfälle innerhalb der Lernfabrik.

6.2 Ausblick

Die in dieser Studienarbeit entwickelte Konzeptionierung schafft eine fundierte Grundlage für die spätere praktische Umsetzung der Auftragsverwaltung und Auftragsbearbeitung in der Zukunftsfabrik Bodensee. Für eine vollständige Realisierung ist insbesondere die technische Implementierung der beschriebenen Schnittstellen zwischen MES FLEX, EDGE CONNECT und der SPS erforderlich. Dabei müssen die konzeptionell vorgesehenen Signalzuordnungen, Handshake-Mechanismen und Auftragslogiken in das bestehende Automatisierungssystem integriert und unter realen Bedingungen validiert werden.

Ein wesentlicher nächster Schritt besteht darin, das SPS-seitige Auftragsmanagement vollständig umzusetzen und die Behandlung konkurrierender Auftragsquellen aus MES und HMI robust abzusichern. Hierbei sind insbesondere Priorisierungslogiken, Scheduling-Mechanismen sowie Konzepte zur Fehlerbehandlung und Wiederaufnahme nach Spannungs- oder Medienausfällen zu berücksichtigen. Ebenso sollte die Übergabe von Aufträgen, Zählerständen und Statusmeldungen in einer Testumgebung umfassend geprüft werden, um eine stabile und nachvollziehbare Produktionssteuerung sicherzustellen.

Darüber hinaus eröffnet die entwickelte Struktur weitere Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Lernfabrik. Die vorgeschlagene Architektur kann als Referenzlösung

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

für weitere Maschinen oder Anlagen dienen und perspektivisch um zusätzliche Funktionen wie detailliertere Feinplanung, erweiterte Rückverfolgbarkeit oder eine tiefere OEE-Auswertung ergänzt werden. Auf diese Weise kann die in dieser Arbeit dargestellte Konzeptionierung als Ausgangspunkt für eine schrittweise Erweiterung der digitalen Fertigungsumgebung genutzt werden.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Literaturverzeichnis

[1] J. Kletti, *MES – Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung*, 3. Aufl. Springer Vieweg, 2015, ISBN: 978-3-662-46897-1.

[2] IBM Corporation. „Was ist ein Manufacturing Execution System (MES)?“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.ibm.com/de-de/topics/mes-system

[3] MPDV Mikrolab GmbH. „Manufacturing Execution System (MES).“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.mpdv.com/industrie-4-0/smart-factory-glossar/manufacturing-execution-system-mes

[4] SAP SE. „Was ist ein Manufacturing Execution System (MES)?“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.sap.com/germany/products/scm/digital-manufacturing/what-is-mes.html

[5] Bechtle PLM. „Manufacturing Execution System (MES).“ Zugriff am 07.12.2025. Adresse: https://www.bechtle-plm.com/wissen/glossar/manufacturing-execution-system-mes/

[6] IBM Corporation. „Funktionsweise von MES-Systemen.“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.ibm.com/de-de/think/topics/mes-system

[7] FASTEC GmbH. „Was ist ein MES-System?“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.fastec.de/aktuelles/was-ist-ein-mes-system/

[8] *VDI 5600 Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems)*, Richtlinie des VDI, Beuth-Verlag, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2008.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

[9] *VDI 5600 Blatt 8: Fertigungsmanagementsysteme – Schnittstellen und Datenmodelle*, Richtlinie des VDI, Beuth-Verlag, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2010.

[10] *MES Functionalities and Models*, Whitepaper von MESA International, Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA), 1997.

[11] GFOS mbH. „Manufacturing Execution System: Funktionen und Vorteile für die Industrie.“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.gfos.com/de/lexikon/mes/

[12] ERP.de Redaktion. „Was ist ein Manufacturing Execution System (MES)?“ Zugriff am 29.12.2025. Adresse: https://www.erp.de/erp-software/produktion/was-ist-ein-mes

[13] J. Kletti, *MES-Kompendium: Leitfaden für Manufacturing Execution Systems*. Springer Vieweg, 2016, ISBN: 978-3-662-57219-1.

[14] Springer Gabler Verlag. „Reihenfolgeplanung.“ Gabler Wirtschaftslexikon, besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/reihenfolgeplanung-44555

[15] Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. „Prioritätsregel,“ besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://wi-lex.de/index.php/lexikon/inner-und-ueberbetriebliche-informationssysteme/sektorspezifische-anwendungssysteme/produktionsplanungs-und-steuerungssystem/fertigungssteuerung/prioritaetsregel/

[16] Springer Gabler Verlag. „Prioritätsregeln.“ Gabler Wirtschaftslexikon, besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/prioritaetsregeln-42938

[17] FORCAM ENISCO GmbH. „Feinplanung,“ besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/funktionalitaeten/feinplanung/

[18] SPS-Profis.de. „Handshake.“ Glossar, besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://www.sps-profis.de/definition/handshake/

[19] SPS-Profis.de. „Handshaking.“ Glossar, besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://www.sps-profis.de/definition/handshaking/

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

[20] FORCAM ENISCO GmbH. „Was bedeutet DNC?“ Besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://forcam.com/was-bedeutet-distributed-numerical-control-dnc

[21] FORCAM ENISCO GmbH. „Maschinen digitalisieren mit EDGE CONNECT.“ Achtung: ggf. identisch mit bereits vorhandener Referenz [14] der Studienarbeit T3_3200 - Key bitte abgleichen, besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/blog/maschinen-digitalisieren-mit-edge-connect/

[22] FORCAM GmbH. „Connectivity & Model,“ besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/l/maschinenanbindung/

[23] FORCAM GmbH. „Smarte Fertigung via Cloud: 3 Schritte - Maschinen anbinden, Signale erfassen, Daten auswerten,“ besucht am 7. Juli 2026. Adresse: https://forcam.com/3-schritte-zur-smarten-fertigung-via-cloud/

[24] FORCAM ENISCO GmbH. „FORCAM ENISCO's MES Product Portfolio: The right solution for every plan.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/en/blog/the-right-solution-for-every-plan-forcam-eniscos-mes-product-portfolio/

[25] FORCAM ENISCO GmbH. „Digitize and optimize your manufacturing with MES FLEX.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/en/force-mes-flex/

[26] FORCAM ENISCO GmbH. „Maschinen digitalisieren mit EDGE CONNECT.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/blog/maschinen-digitalisieren-mit-edge-connect/

[27] FORCAM ENISCO GmbH. „Konnektivität 4.0: Digitale Vernetzung in der Industrie.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/blog/konnektivitaet-40/

[28] FORCAM ENISCO GmbH. „Das IIoT braucht IT-Komponisten.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/blog/das-iiot-braucht-it-komponisten/

[29] FORCAM ENISCO GmbH. „SAP DM und EDGE CONNECT: Integration in die SAP Manufacturing Suite.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: https://forcam-enisco.net/blog/sap-dm-und-edge-connect-forcam-integration/

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

[30] FORCAM GmbH. „FORCAM FORCE – Die MES-Lösung für smarte Produktion.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: `https://www.youtube.com/watch?v=VihyVRveqYM`

[31] FORCAM ENISCO GmbH, *Handbuch - Stammdaten und Basiskonfiguration*, Mai 2025. besucht am 6. Juli 2026.

[32] FORCAM ENISCO GmbH. „Discover how FORCAM ENISCO's MES Flex digitizes manual workplaces.“ Zugriff am 05.01.2026. Adresse: `https://www.youtube.com/watch?v=hRGNixLdFkA`

[33] FORCAM ENISCO GmbH, *Handbuch FORCAM Force Edge Connect*, 2024. besucht am 6. Juli 2026.

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Abb.	Abbildung
API	Application Programming Interface
BDE	Betriebsdatenerfassung
ca.	circa (ungefähr)
CTS	Clear to Send (Handshaking-Signal bei serieller Kommunikation)
DACQ	Data Acquisition
DB	Datenbaustein
DCU	Data Collection Unit
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
DNC	Distributed Numerical Control
EDD	Earliest Due Date (Frühester-Liefertermin-Regel)
EDGE	FORCE EDGE CONNECT (Edge-Computing- und Konnektivitätsplattform von FORCAM)
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera (und so weiter)
FCFS	First Come First Served
FORCAM	FORCAM ENISCO GmbH
ggf.	gegebenenfalls
HMI	Human Machine Interface

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

i.d.R.	in der Regel
IIoT	Industrial Internet of Things
insb.	insbesondere
IWT	Institut für Weiterbildung, Wissens- und Technologietransfer
KI	Künstliche Intelligenz
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MES FLEX ...	FORCE MES FLEX (Manufacturing Execution System von FORCAM)
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NC	Numerical Control
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PLC	Programmable Logic Controller (englische Bezeichnung für SPS, verwendet im englischsprachigen Abstract)
PTZ	Produktions- und Transferzentrum (Zukunftsfabrik Bodensee)
REST	Representational State Transfer
RTS	Request to Send (Handshaking-Signal bei serieller Kommunikation)
S7	Simatic S7 (SPS-Steuerungsfamilie von Siemens)
SAP DM	SAP Digital Manufacturing
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SPT	Shortest Processing Time (Kürzeste-Operationszeit-Regel)
Tab.	Tabelle

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VM	Virtuelle Maschine
XON/XOFF ..	Steuerzeichen für Software-Handshaking (Transmitter On/Transmitter Off)
z. B.	zum Beispiel
ZDP	Zentrum für Digitalisierung in Produktion und Produktentwicklung

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Abbildungsverzeichnis

3.1 Übersicht Netzwerk-Infrastrukur im ZDP 17

5.1 Kommunikationsschema MES- Edge Connect- SPS 33
5.2 Handshake SPS-Edge Connect 34
5.3 Gantt-Diagramm Scheduler 38

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

Tabellenverzeichnis

A.1 Liste der verwendeten Künstliche Intelligenz basierten Werkzeuge . I

Docusign Envelope ID: 48BAE60B-309D-8469-83BE-2D1FCDE7E563

A Anmerkung zur Nutzung von Künstlicher Intelligenz

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Künstliche Intelligenz (KI basierte Werkzeuge benutzt. Tabelle A.1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Werkzeuge und den jeweiligen Einsatzzweck.

Tabelle A.1: Liste der verwendeten KI-basierten Werkzeuge

Werkzeug	Beschreibung der Nutzung
Perplexity AI Pro	▪ Chatbot der Perplexity AI, Inc. ▪ Zusammenstellen von Literatur für Grundlagen und Systemanalyse ▪ Verbesserung des Satzbaus und der Grammatik ▪ Erstellung des Abkürzungsverzeichnisses ▪ Überprüfung auf fehlerhafte Formulierungen oder Logikfehler im Text