

Vorgehensweise zur Implementierung der VDMA Spezifikation „OPC UA for Machinery (OPC 40 001)“ in Maschinen und IT-Systemen erarbeiten

Bachelorarbeit

Angewandte Informatik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Mosbach

Studienpartner

AZO GmbH & Co. KG



von

Rico Kursidem

betreut von

Steffen Michalowski

und

Prof. Dr. Mielebacher

15. August 2023

Abkürzungsverzeichnis

API Advanced Programming Interface

COM Component Object Model

DCOM Distrebuted Component Object Model

ERP Enterprse Recource Planning

HMI Human Maschine Interface

IoT Internet of Things

M2M Maschine-zu-Maschine

MES Manufacturing Execution System

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

OPC UA Open Platform Communications Unified Architecture

SOA Service orientierte Architektur

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol

UMATI Universal machien technology interface

VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

VDW Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Problemstellung und Ziel	2
1.2	Unternehmen	3
1.3	Forschungsfragen	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	OPC UA	5
2.1.1	Struktur	7
2.1.2	Kommunikationsaufbau	8
2.1.3	Sicherheit	11
2.2	Umati	11
2.2.1	VDMA	14
2.2.2	OPC UA for Machinery	15
2.3	Weitere Technologien	16
2.3.1	Docker	16
2.3.2	MQTT	16
3	Methodik	18
3.1	Literaturrecherche	18
3.2	Evaluation	18
3.3	Zeitplanung	19
4	Ergebnisse	20
4.1	Anforderungsanalyse	20
4.1.1	Vorgehen	20
4.1.2	Prototyp	20

Inhaltsverzeichnis

4.2	Lösungsansatz	22
4.2.1	Struktur	22
4.2.2	OPC UA Server - DataFeed	23
4.2.3	Eigenimplementierung	23
4.3	Marktanalyse	23
4.4	Wirtschaftlichkeit und Projektanalyse	23
4.4.1	Kostenplanung	23
4.4.2	Fallbeispiel	23
4.5	Implementierung eines Prototyps	23
4.5.1	Struktur	23
4.5.2	Sicherheit	25
4.5.3	OPC UA Server	25
4.5.4	OPC UA Client	26
4.5.5	MQTT Broker	26
4.5.6	Integration in bestehende Infrastruktur	26
5	Diskussion und Fazit	27

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die vier Ebenen der Interoperabilität	6
2.2	Aufbau des OPC UA Standards, Angelehnt an: Abbildung 1.7 in [2] . . .	8
2.3	Kommunikationsstruktur OPC UA	9
2.4	2022 Industrial network market shares according to HMS Networks [18] .	10
2.5	Automatisierungspyramide nach Siepmann, Angelehnt an: Folie 8 in [9] .	13
2.6	Interfaces basierend auf OPC UA for Machinery [12]	14
3.1	Softwarebewertungskriterien ISO 25010	18
3.2	Grantt-Diagramm zum Projektablauf	19
4.1	RoLog von AZO GmbH & Co. KG [17]	21
4.2	wichtigste Bewertungskriterien des Prototypen	22
4.3	Datenfluss und Struktur des Prototypen	25

Tabellenverzeichnis

Abstract

Deutsch

English

1 Einführung

Die moderne Welt wird zunehmend vernetzter. Unternehmen weiten ihre Wertschöpfungsketten global aus und erzeugen so ein weltweites Abhängigkeitsnetz. Unternehmen erweitern Ihren Kundenmarkt auf die gesamte Welt und beziehen von überall Zulieferungen. In der Industrie ist es dabei besonders wichtig, dass alle Teilnehmer an Wertschöpfungsketten, Arbeitsgruppen und Verträgen dasselbe Verständnis von Daten haben. Um ein weltweit, einheitliches und unmissverständliches Kommunikationssystem zu ermöglichen, werden Standards verwendet. In Zeiten der Industrie 4.0 nehmen Standardisierungen einen noch wichtigeren Platz ein als zuvor. Da Anlagen immer mehr aus Maschinen verschiedenster Hersteller zusammengesetzt sind, ist ein gemeinsamer übergreifender Kommunikationsstandard besonders wichtig, um eine fehlerfreie, effiziente und wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen.

Standardisierung wird verwendet, um effizienteren Austausch und effektivere Prozesse durchzuführen. Ein sehr altes Beispiel sind Sprachen. Eine Menge an Regeln, welche zur Kommunikation genutzt werden, auf die sich alle Teilnehmenden geeinigt haben. In dieser Arbeit soll es um die Standardisierung im Bereich der Maschine-zu-Maschine (M2M) Kommunikation gehen. Durch die Herausforderungen von Industrie 4.0 kann ein guter Standard die Integration mehrerer Systeme vereinfachen und Kosten sparen.

In der M2M Kommunikation existieren bereits Standards, die schon vor Industrie 4.0 entworfen wurden. Dazu gehört auch Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA). Universal machine technology interface (UMATI) baut auf diesem Standard auf und verspricht weitere Aspekte wie beispielsweise eine Umgebung in der neue Maschinen durch Plug & Play integriert werden können. Das Ziel von UMATI ist es, die zahlreichen Implementationen von OPC UA Schnittstellen zu standardisieren und zusammenzufassen, um so für Produzenten von Anlagen und Software einen gemeinsamen Standard zu finden. Das Ziel dieser Arbeit ist UMATI zu analysieren, die Implementation dieses Standards zu erforschen und ein Proof-of-Concept zu entwickeln, der die Fähigkeiten dieser Schnittstelle demonstriert.

1.1 Problemstellung und Ziel

Durch die zunehmende Automatisierung der Produktion und Fertigung stehen viele Produzenten vor der Aufgabe, zahlreiche Maschinen verschiedener Hersteller in ihren Fertigungsprozess zu integrieren. Viele dieser Maschinen nutzen verschiedene Kommunikationsprotokolle, Datenformate und Schnittstellen, was die Integration dieser diversen Systeme erschwert. Durch eine komplizierte Integration kann Vendor Lock-in entstehen. Dieses Konzept beschreibt die Bindung eines Kunden an einen Anbieter, da dieser eine Technologie oder Kommunikationsstrategie integriert, die andere Hersteller nicht oder nur extrem schwer integrieren können. Dies kann zu einer Atmosphäre führen, welche für den Kunden weniger Flexibilität und Kontrolle über seine eigene Produktion gibt und gleichzeitig die Kosten steigen lässt. Um dieses Problem zu lösen, müssen sich die Produzenten zu einem Standard zusammenfinden und die Interoperabilität ihrer Systeme zu gewährleisten. [9]

Für AZO als Anlagenproduzent ist es von großem Interesse, mit Anlagen und Maschinen anderer Hersteller kommunizieren zu können und dabei die Integration möglich einfach zu realisieren. Auch für Entwickler von (! (!)MES) bedeutet die Standardisierung von Kommunikationsprotokollen eine schnellere und einfachere Entwicklung, was zu niedrigeren Entwicklungskosten führt und die Robustheit der Systeme erhöht. AZO nimmt an der Entwicklung von UMATI teil, um diese Standardisierung zu erreichen. Dieser Standard möchte die Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Maschinen und auch mit der darüber liegenden Datenverarbeitung definieren und basiert auf dem offenen Standard OPC UA.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, UMATI in einem Testumfeld anhand eines Proof-of-Concept aufzubauen. Um dies zu erreichen, soll zunächst eine Marktanalyse durchgeführt werden und mögliche Lösungen zum Versenden und Empfangen von Daten zwischen Maschine und (!MES) zu finden. Diese sollen anhand von selbst entwickelten Kriterien abgewogen und bewertet werden. Die vielversprechendsten Umsetzungen sollen in einem Testsystem implementiert werden und für zukünftige Demonstrationen auf Messen für AZO zur Verfügung gestellt werden. Außerdem soll evaluiert werden, ob UMATI auch in der Low-Code Plattform Node Red angewendet werden kann und wenn möglich, das entstehende System als Open-Source Lösung der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

Der Prototyp soll ebenfalls eine Integration in ACAS umfassen. Damit kann gezeigt werden, dass die Schnittstellen von AZO Anlagen mit UMATI realisierbar sind. Diese

Integration muss im Nachgang weiter evaluiert werden, um festzustellen, ob UMATI als Standardisierung eine geeignete Lösung ist.

1.2 Unternehmen

Diese Arbeit wird mit dem Dualen Partner *AZO GmbH & Co. KG* durchgeführt. AZO bietet maßgeschneiderte Lösungen für die automatisierte Förderung, Lagerung und Dosierung von Rohstoffen weltweit an. Dabei werden Anlagen für die Bereiche der Chemie-, Nahrungsmittel-, Pharma-, Kosmetik und Kunststoffindustrie gefertigt. Diese Projekte umfassen die Planung, Fertigung und Montage, sowie die Automatisierung der Anlagen.

AZO entwickelt ein eigenes MES-System ACAS, welches die Kommunikation zwischen Anlagen von AZO, aber auch Anlagen von anderen Herstellern, mit den Kunden vereinheitlichen und verbessern soll. Dabei soll ein umfassendes System entstehen, welches Steuerung, Visualisierung und Überwachung der Produktion übernehmen und in einer zentralen Software bündeln soll.

ACAS entsteht in der Entwicklungsabteilung, welche ebenfalls an dieser Arbeit beteiligt ist. Sie fokussiert sich auf die Automatisierung von AZO Anlagen im Bereich von SPS, Steuerungen bis zur Datenverarbeitung und Erhebung auf abstrahierter Ebene.

1.3 Forschungsfragen

Die Standardisierung der Integration von verschiedensten Maschinen in eine Umgebung ist nötig und kann zu verstärkten Effizienzsteigerungen und Aufwandsersparnis führen. Für Anlagenbauer verspricht die Nutzung von Umati, diese Integration in einen schnellen und effizienten Prozess zu wandeln. Um das Potenzial von Umati zu evaluieren, wurden folgende Schwerpunkte betrachtet:

- **Q1:** Welche Herausforderungen ergeben sich bei der Umsetzung von Umati?
- **Q2:** Welche Lösungen zur Umsetzung von Umati sind am Wirtschaftlichsten?
- **Q3:** Wie kann die Datenkommunikation von Anlage und ACAS bestmöglich implementiert werden?

1.4 Aufbau der Arbeit

Nachfolgend werden Thematiken beschrieben die zum grundlegenden Verständnis der Arbeit beitragen (Kapitel 2). Daraufhin werden die Methodiken beschrieben, mit denen die Informationen für diese Arbeit erhoben wurden (Kapitel 3). Im Hauptteil der Arbeit (Kapitel 4) wird der restliche Ablauf der Arbeit beschrieben. Es werden zunächst Informationen zur Entscheidungsfindung eingeholt und in Analysen in Relation gesetzt und daraufhin wird die Entwicklung des Prototyps beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der gefundenen Ergebnisse und einem Fazit (Kapitel 5).

2 Grundlagen

2.1 OPC UA

OPC UA ist ein unternehmensunabhängiger, offener Standard zur Kommunikation von Informationen und Daten zwischen Maschinen im industriellen Umfeld. Das Protokoll wurde 2008 von der OPC Foundation veröffentlicht und nimmt sich zur Aufgabe, die Interoperabilität von Systemen zu fördern. Es verwendet eine Service orientierte Architektur (SOA) und kann auf verschiedensten Betriebssystemen verwendet werden. OPC UA ist sehr gut skalierbar und kann deshalb als Kommunikationsprotokoll bei kleinen Internet of Things (IoT) Systemen als auch bei komplexen Cloud-Systemen zur Anwendung kommen.

OPC UA baut auf einem Server-Client-Modell auf, wobei der Client die Anfragen an den Server senden muss. Der Client fragt den Server nach Daten und analysiert diese während der Server die Daten der dahinterliegenden Anlagen in übertragbare Strukturen bringt und sie zur Verfügung stellt. Da der jeder Client an mehreren Servern Daten erheben kann, wird das System gut skalier- und erweiterbar.

Das Ziel von OPC UA und auch im weitergetragenen Sinne von Umati ist das Erreichen von Interoperabilität von Maschinen im industriellen Bereich. Interoperabilität beschreibt die Standardisierung von Kommunikation zwischen Systemen. Allgemein kann diese in 4 Stufen eingeteilt werden, wobei jede Ebene auf die darunterliegende aufbaut. Im Schaubild 2.1 sind die vier Ebenen Strukturelle, Syntaktische, semantische und Organisatorische Interoperabilität abgebildet.

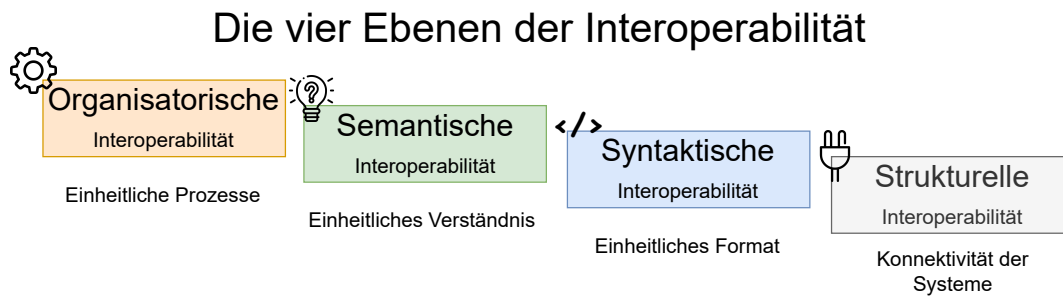


Abbildung 2.1: Die vier Ebenen der Interoperabilität

Die strukturelle Interoperabilität beschreibt Verbindungen zwischen den Systemen, weshalb sie auch oft als Konnektivität bezeichnet wird. Der Datenaustausch kann nur erfolgen, wenn die beteiligten Systeme miteinander verbunden sind und eine geeignete Schnittstelle implementieren. Diese Verbundenheit kann über ein Netzwerk mit TCP/IP oder HTTP erreicht werden oder kann ein Übertragungsmedium wie USB festlegen. [9]

Sind Systeme syntaktisch interoperabel, nutzen und verstehen sie die Struktur der Daten. Hierfür können festgelegte Standards wie XML oder Json verwendet werden. [10]

Die semantische Interoperabilität beschreibt das vereinheitlichte Verständnis der Daten. Kommunizieren zwei Systeme miteinander, so müssen sie unter denselben Werten auch dasselbe verstehen. Ein Beispiel für einen Standard, der semantische Interoperabilität umsetzt, ist der "International Classification of Diseases". Bei diesem geht es um die Kommunikation von Krankheiten zwischen Ärzten und wurde von der WHO eingeführt. Jede Krankheit hat einen festgelegten Code, wodurch eine eindeutige Kommunikation gewährleistet ist. [10]

OPC UA legt anhand des Information-Models die Syntax der Daten fest, wodurch die syntaktische Interoperabilität gewährleistet ist. Die semantische Interoperabilität wird anhand der Companion Standards festgelegt, welche auf den OPC UA Standard aufgesetzt werden. Diese beschreiben Technologie-spezifische Informationsmodelle, welche von verschiedensten Arbeitsgruppen erstellt werden. Es gibt unterschiedliche Companion Spezifikationen für unterschiedliche Anwendungsgebiete von OPC UA, beispielsweise für bestimmte Maschinengruppen oder Branchen. Sie legen jedoch immer fest, wie bestimmte Daten verstanden werden müssen.

OPC UA entstand aus dem zuvor entwickelten Standard OPC Classics. Der alte Standard setzte die Kommunikation im Bereich der Automatisierung bereits sehr gut um. Der Nachteil an Classics war jedoch die fehlende Plattformunabhängigkeit. OPC UA un-

2.1. OPC UA

terstützt heute jegliche Betriebssysteme für Clients als auch für die Server, während der Vorgänger auf einem Windowssystem betreiben werden musste. Auch die Kommunikation war auf die von Microsoft entwickelte Technologien Component Object Model (COM) und Distrebuted Component Object Model (DCOM) ausgelegt. Durch die Ablösung dieses Standards durch OPC UA wird über TCP/IP und SOAP kommuniziert, welche beide Plattformunabhängig sind und somit kann OPC UA auch auf anderen Plattformen wie Linux, Mac und Android ohne Probleme angewandt werden. [10]

2.1.1 Struktur

OPC UA ist eine Sammlung von Standards, welche in unterschiedlichen Spezifikationen definiert sind. Diese gliedern sich in eine hierarchische Struktur, welche dann bei der Implementierung aufeinander aufbauen. In Abbildung 2.2 ist die Struktur des UA Framework abgebildet. Im unteren Teil und somit der Grundbaustein dies Modells stehen Spezifikationen zum Transport und der Service Discovery. Diese beschreiben über welche Medien Daten transportiert wird und wie erkannt werden kann, welche Services existieren, die den OPC UA Standard implementieren. [2; 8]

Zur Infrastruktur, welche im Allgemeinen die Konnektivität gewährleistet, ist auch die Spezifikation für den Datenzugang (Information Access) definiert. Außerdem werden auch weitere Standards beschrieben, um die Sicherheit und Robustheit des Systems zu gewährleisten.

Auf den Standards der Infrastruktur bauen die Spezifikationen der Informationsmodelle auf. Diese bestehen aus den offiziellen OPC UA Spezifikationen und den darauf aufbauenden Companion und Vendor Informationsmodellen. [2]

Die offiziellen Standards befassen sich mit dem allgemeinen Austausch von Daten. Hierzu gehören der Austausch von Echtzeitdaten (DA), historischen Daten (HA) und Alarmen (AC). Neben diesen Hauptfaktoren werden auch andere Standards festgelegt, die das offizielle OPC UA Information Modell bilden. [2; 8]

Auf dem OPC UA Standard setzen die Industriestandardinformation Modelle auf. Diese sind von mehreren Teilhabern entwickelte Standards, die beispielsweise innerhalb einer bestimmten Branche oder Industrie-Gruppen verwendet werden. Diese Standards stehen in den Companion Spezifikationen. Beispielsweise gibt es einzelnen Spezifikationen für AutoID Systeme oder Spritzgussmaschinen, die Abwandlungen und Spezialisierungen

2.1. OPC UA

haben, die auf ihren Bereich angepasst sind. [2; 8]

Auf der obersten Ebene des Schaubilds in Abbildung 2.2 sind die Vendor Informationsmodelle dargestellt. Diese sind weitere Standards, die die Companion Standards erweitern und innerhalb einer Maschinenumgebung eines Erstellers umgesetzt werden. In diesen Standards sind Veränderungen individueller Hersteller definiert, damit eine weitere Spezialisierung über die Companion Spezifikationen hinaus stattfinden kann. [2; 8]

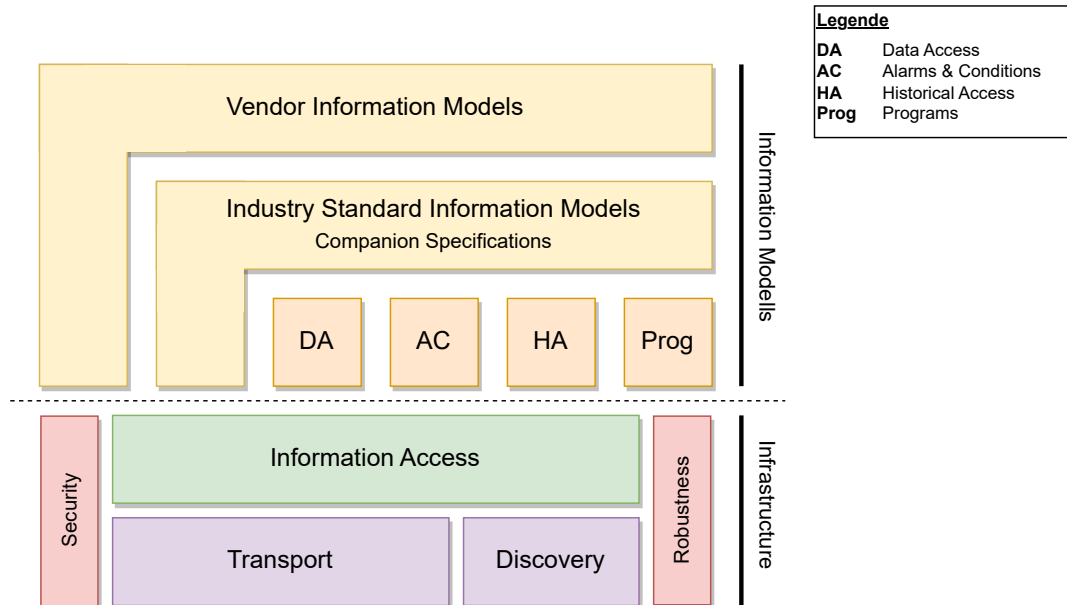


Abbildung 2.2: Aufbau des OPC UA Standards,
Angelehnt an: Abbildung 1.7 in [2]

2.1.2 Kommunikationsaufbau

OPC UA besteht aus drei Komponenten, deren Zusammenwirkung in Abbildung 2.3 abgebildet ist. Mehrere Field Connections, die die Sensorik oder Maschinen darstellen, mit welchen kommuniziert werden soll. Die Daten sollen zu den OPC UA Clients geleitet werden. Dies können Human Maschine Interface (HMI) oder MES-Systeme sein, die die Daten der Maschinen auswerten oder Steuerungsbefehle absenden möchten. OPC UA standardisiert diese Kommunikation über den OPC UA Server. Dieser setzt den OPC UA Standard um und stellt das notwendige Advanced Programming Interface (API) für die Datenabfrage aus der Sicht der Clients zur Verfügung. [8]

Der OPC UA Server implementiert die proprietären Kommunikationsprotokolle, die vom

2.1. OPC UA

Maschinenhersteller entwickelt wurden, um mit den Anlagen und den Field Connections zu kommunizieren. Je nach Art der Daten, die die Maschine weiter gibt, werden die Daten auf dem OPC UA Server abgespeichert oder an den Client weiter gegeben. Ein OPC UA Server kann in zwei Formen entstehen. Der Hersteller kann seiner Maschine die OPC UA Standards bereits bei der Entwicklung einprogrammieren. Damit ist der Server in der Maschine integriert und die Maschine ist so von Beginn an OPC UA fähig. Manche SPS Geräte implementieren auch die Möglichkeit einen OPC Server direkt auf der Maschine zu konfigurieren. Sollte der Hersteller die Spezifikationen jedoch nicht implementieren, kann der Server auch zusätzlich zwischen die Maschine und den Client geschaltet werden. Durch die Unabhängigkeit des Herstellers sind diese Server oft mit mehr Kommunikationsprotokollen ausgestattet, was deren Möglichkeiten, mit der Maschine zu interagieren erhöht. [8]

Die Kommunikation mit dem Client läuft dabei 1 zu 1 ab. Allerdings kann auch ein 1 zu n Kommunikationsmodell über Publish and Subscribe implementiert werden. Um diese Funktion jedoch zu nutzen, muss der Server mit der OPC UA Pub/Sub Spezifikation erweitert werden. [9]

Der Client kann die Daten über die standardisierte API des OPC UA Servers abfragen. Es können Echtzeitdaten, historische Daten abgerufen werden. Außerdem gibt es eine Spezifikation, wie Alarmierungslogik umgesetzt werden soll. Dies wird anhand der Implementation auf Serverebene deutlich vereinfacht, da sie dann Hersteller unabhängig ist. [8]

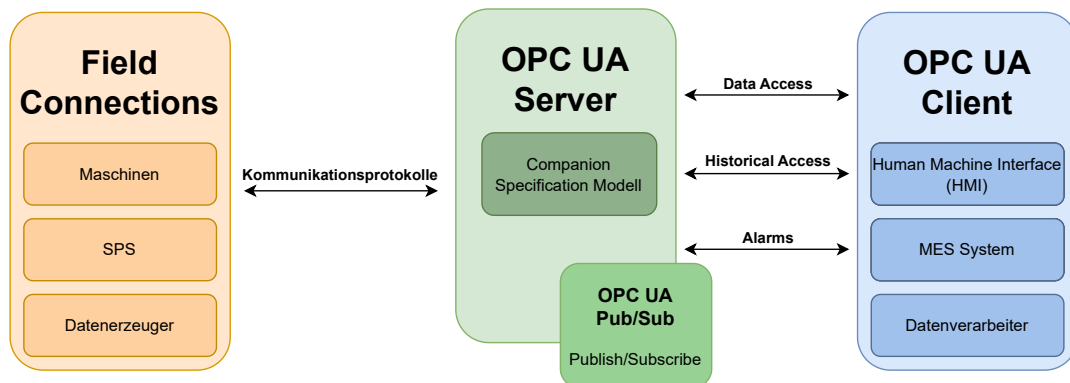


Abbildung 2.3: Kommunikationsstruktur OPC UA

In der Automation werden verschiedenste Methoden verwendet, um Endpunkte an eine Anlage anzubinden. In Abbildung 2.4 sind der Anteil der Verschiedenen Netzwerktypen

2.1. OPC UA

in der Industrie 2022 veröffentlicht von HMS Networks. Die drei größten Felder sind Fieldbus, Kabellos (Wireless) und Industrielles Ethernet (Industrial Ethernet) wobei letzteres den größte Anteil ausmacht mit 66%. OPC UA vereint diese Kommunikationsprotokolle in einem Server und so können Clients die Daten über den OPC UA Server auslesen und müssen nicht für jede Maschine ein eigenes Protokoll implementieren. [18]

Anders Hansson, Chief Marketing Officer von HMS Networks erklärt sich den Wachstum des Industriellen Netzwerkmarktes aufgrund der steigenden nachfrage in der modernen Industrie, nachhaltig, effizient und produktiv zu bleiben und gleichzeitig flexibele und qualitative Fertigung zu ermöglichen. Die Netzwerke zur Kommunikation sind dabei ein Schlüsselfaktor um die genannten Punkte zu erreichen. [18]Bei einem instgesamten Wachstum der Nutzung dieser Systeme um 8% zeigen die Entwicklungen in diesen Bereichen eine deutliche Relevanz für die Automatisierung von und Kommunikation mit Maschinen.

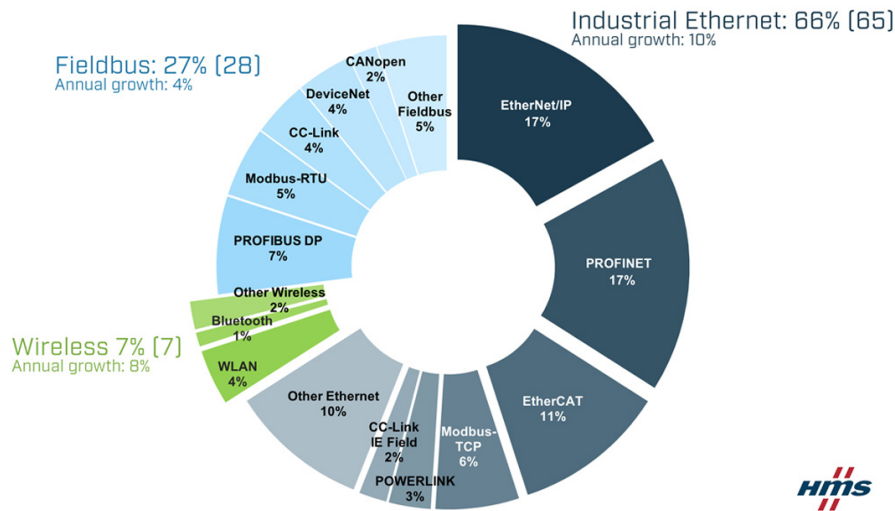


Abbildung 2.4: 2022 Industrial network market shares according to HMS Networks [18]

OPC UA nutzt einen Objektorientierten Ansatz zum Datenaustausch. Dabei werden hierarchische Daten übergeben. Jedes Objekt kann aus Attributen und Methoden bestehen. Die Attribute beinhalten Werte welche gelesen werden können, während die Methoden vom Client aufgerufen werden können um der Maschine eine Nachricht zu senden.

2.1.3 Sicherheit

Eines der Ziele von OPC UA ist es, eine sichere Verbindung und Kommunikation zu ermöglichen. Deshalb trägt bereits die zweite Spezifikation von OPC UA den Namen „Security Modell“. Hierin ist festgelegt, welche Sicherheitsmechanismen bei der Nutzung von OPC UA angewendet werden sollen.

Die OPC Foundation beschreibt Unified Architecture sicher und Firewall freundlich, da OPC UA über den Port 443 kommuniziert, der meist nicht blockiert ist. OPC UA unterstützt Security auf Transport- und Applikationsebene anhand von selbst entworfenen Protokollen und Erweiterungen von bereits bestehenden Standards. Die Codierung findet auf binärer Ebene statt, wobei die Kommunikation über HTTPS abläuft. Die Authentifizierung von Clients und Servern findet über X509 Zertifikate statt, wobei der Entwickler der UA Anwendung die Anbindung an einen Zertifikatsspeicher selbst übernehmen kann. [13; 14]

Auf Applikationsebene gibt es Sicherheitsmechanismen, welche die Authentifikation und Autorisierung der Nutzer bearbeiten. Hierbei kommen Passwörtern, Zertifikaten, Web-tokens und weiteres zum Einsatz. Außerdem können mit Rechten für Nutzer weitere Einschränkungen auf den Zugriff einzelner Nutzer gelegt werden. Zusätzlich können Aktivitäten von Nutzern und dem System geloggt werden, um die Nachvollziehbarkeit zu erhöhen und die Sicherheit des Systems zu stärken. [13; 14]

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik führte 2017 eine Sicherheitsanalyse in Kooperation mit TÜV Süd aus und konnte kleine systematischen Fehler in der Sicherheit entdecken. Sie schreiben OPC UA eine hohe Sicherheit zu, wenn die Mode Sign und security Mode SignAndEncrypt verwendet werden. [15]

2.2 Umati

Umati ist eine globale Initiative zur Standardisierung von Interfaces zur Kommunikation zwischen Produktionsanlagen. Sie wird vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) verwaltet und vorangetrieben von den zahlreichen Mitgliedern der beiden Vereinigungen. Das Ziel ist es, die Kommunikation zwischen Maschinen möglichst einfach, sicher und einfach zu gestalten. Es soll eine Plug & Play Umgebung entstehen, in der neue Maschinen in eine Anlage durch bloßes Einstecken ins Kommunikationsnetzwerk inte-

2.2. UMATI

griert werden können. Die Umati Initiative entwickelt Standards, welche weltweit zum Einsatz kommen sollen, um eine starke internationale Gemeinschaft um diesen Standard zu erreichen. [7]

UMATI baut auf den OPC UA Standards der OPC Foundation auf. OPC UA bildet dabei die Basis und definiert, wie und was kommuniziert werden soll. Es legt fest, was die Rahmenbedingungen für Konnektivität und syntaktische Interoperabilität sind. [7] OPC UA ermöglicht es die Semantische Interoperabilität über Companion Spezifikationen zu versichern. Diese werden auch schon in der Industrie eingesetzt weshalb sich UMATI die Aufgabe gemacht hat, die verschiedenen Spezifikationen zu vereinheitlichen damit beispielsweise die Identifizierung einer Maschine immer gleich abläuft.

Umati soll vor allem die vertikale und horizontale Integration im Unternehmen erleichtern. In Abbildung 2.5 ist die Automatisierungspyramide nach Siepmann abgebildet. Je tiefer die Ebene in der Pyramide liegt, desto vielfältiger sind die Systeme dieser Ebene. Während ein Unternehmen nur ein Enterprise Resource Planning (ERP) System verwendet, kann es zahlreiche SPS und noch mehr Ein- und Ausgabensensoren geben. Diese müssen vertikal integriert werden. Dafür werden Daten von den unteren Ebenen in die Systeme weiter oben zur Verarbeitung überreicht. Bei der horizontalen Integration kommunizieren gleichartige Systeme miteinander. Beispielsweise wenn mehrere SPS Daten austauschen oder Daten Abteilungsübergreifend übergeben werden, wie bei einem Datenfluss von SCM zu CRM System sein.

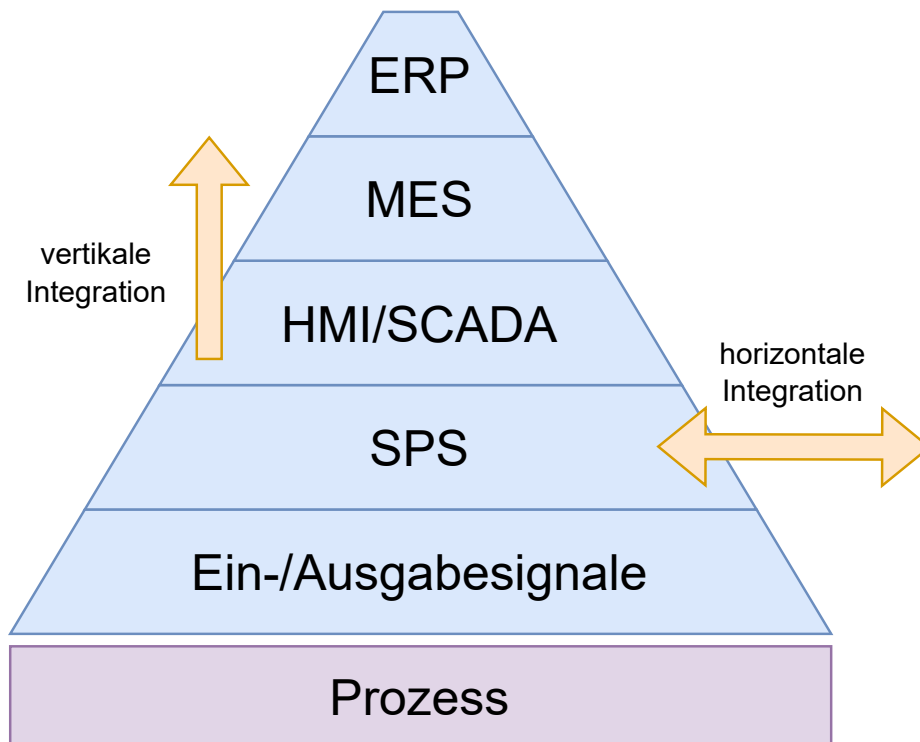


Abbildung 2.5: Automatisierungspyramide nach Siepmann,
Angelehnt an: Folie 8 in [9]

Umati legt standardisierte Interfaces fest, mit denen die vertikale und horizontale Integration möglichst einfach umgesetzt wird. Dadurch kann die Wertschöpfung aus Daten kostengünstiger ablaufen und die Analyse, Verarbeitung und Verwertung von Daten, wie es in der Industrie 4.0 üblich ist, besser ablaufen. Umati hat bereits Vorführungen auf Messen veranstaltet, welche die Funktionsfähigkeit einer Umati Umsetzung demonstrieren. Umati standardisiert dabei die Integration von Maschinen, deren Installation und ganze IT Produktionsumgebungen. [11]

Die Semantische Interoperabilität wurde bereits mit OPC UA über die Companion Spezifikationen erreicht. Allerdings entstehen diese Standards in gesonderten Arbeitsgruppen welche auf die Teilnehmer zugeschnitten sind. Dadurch entstehen viele Spezifikationen in vielen verschiedenen Branchen und Maschinen können nicht mehr ohne Übersetzung kommunizieren. Umati versucht diesen Umstand durch das Zusammenfassung dieser Spezifikationen zu beheben. Es sollen Maschinen entstehen, die alle die selbe Sprache sprechen und so einfach in neue IT

Umati selbst besteht aus verschiedenen Modulen, welche alle Standards für verschiede-

2.2. UMATI

ne Bereiche definieren. In Abbildung 2.6 sind alle Interfaces abgebildet, welche auf der Base Spezifikation OPC 40001 aufbauen. Dieser wird auch OPC 40001 UA for Machinery genannt und ist für die Anlagenbauindustrie gedacht. Umati befindet sich noch in der Entwicklung und ist noch nicht vollständig fertiggestellt, deshalb gibt es Interfaces, welche noch nicht umgesetzt, sondern nur geplant sind. [12]

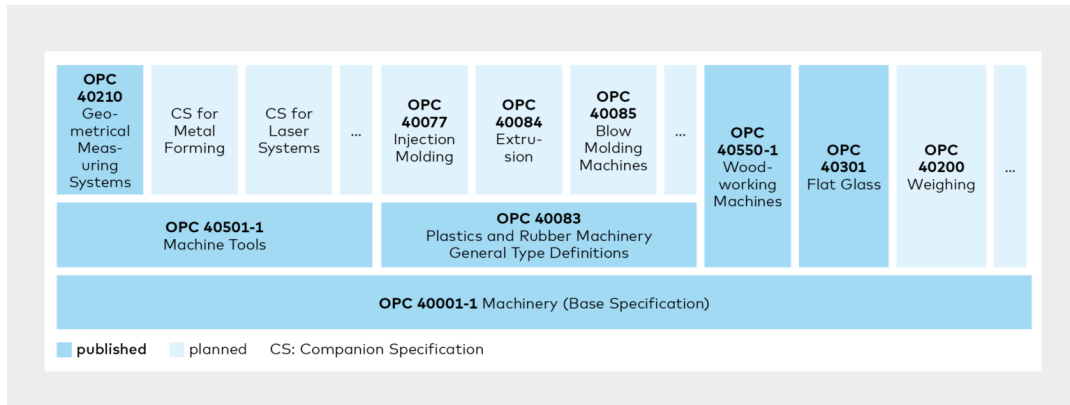


Abbildung 2.6: Interfaces basierend auf OPC UA for Machinery [12]

2.2.1 VDMA

VDMA ist der größte Industrieverbund in Europa und eines seiner Ziele ist es, Umati International zu verbreiten. Der Verband wurde 1892 gegründet und hat seinen Sitz in Frankfurt am Main. Neben der Vertretung der Interessen industrieller Unternehmen in Deutschland und Europa gegenüber der Politik, erarbeitet der VDMA auch Standards und tauscht Know-How zwischen seinen 3.600 Mitgliedsunternehmen aus. [5] In dem Interessenverband sind Firmen aus den Bereichen Maschinenbau, Anlagenbau und der Zulieferindustrie, welche sich Kompetenzen und Informationen in verschiedensten Themenbereichen von Bildung & Modernem Arbeiten über Digitalisierung bis zu rechtlichen Feldern teilen. [6]

Der VDMA wirkt vor allem mit Förderungen in Bereichen, die Innovation bringen. Beispielsweise fördert der Verband Technologien in den Bereichen Industrie 4.0, Digitalisierung und nutzt Lobbyarbeit, um seine Mitglieder auch politisch zu unterstützen. Außerdem veranstaltet der VDMA Messen zur Netzworlbildung und zum Demonstrieren von neusten Technologien seiner Mitglieder. Im Allgemeinen verfolgt der Verband die Stärkung der europäischen Maschinenbaubranche und die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit auf internationaler Ebene. [6]

2.2. UMATI

AZO, der Partner dieser Arbeit, ist auch ein Mitglied des VDMA. Da AZO ein mittelständisches Unternehmen im Anlagenbau ist, setzt sich der VDMA genau für diese Interessen ein und möchte mit Umati eine Plug & Play Umgebung im Anlagenbau ermöglichen. Der VDMA möchte eine erhöhte Interoperabilität zwischen den Maschinen ihrer Mitglieder bewirken und so die Wettbewerbsfähigkeit des europäischen Markts stärken, aber auch in der Standardisierung der internationalen Industrie mitwirken.

2.2.2 OPC UA for Machinery

OPC 40001-1/VDMA 40001-1, auch OPC UA for Machinery, wurde von VDMA und VDM zusammen mit der OPC Foundation entwickelt. Es ist die fundamentale Spezifikation, auf der andere in diesem Bereich aufbauen sollen. Sie wurde im September 2020 veröffentlicht und seit dem mehrfach aktualisiert worden. Der Standard wird auch in Zukunft erweitert werden, um mehr Use Cases abzudecken. Die neuste Version zum Zeitpunkt des Entwurfs dieser Arbeit ist aus August 2023.

Im Allgemeinen deckt dieser Standard fundamentale Bereiche ab. Es wird definiert, welche Datentypen genutzt werden können, wie deren Syntax ist und wie sie in Attributen abgespeichert werden können. Es werden Objekte und Klassen festgelegt und deren Verhalten und Funktionalität. Darüber hinaus beschreibt die Spezifikation auch, wie ein Client im System die Maschinen an den OPC UA Servern finden kann.

OPC for Machinery implementiert keinen festen Typ um als einen Einstiegspunkt für den OPC UA Server. Daher muss auf die Basisspezifikation OPC 40001-1 eine weitere Spezifikation aufgesetzt werden. Im fall dieser Arbeit wird ein Roboter simuliert, weshalb die Spezifikation OPC 40010 Robotics anbietet. Als Mindestanforderung muss Part 1 der Roboticsspezifikation imlementiert werden. Dadurch ergibt sich eine anzahl an Variablen, Funktionen und Strukturen, welche in den Simulationsserver implementiert werden und in Kapitel ??

OPC UA for Machinery definiert, das jede Maschine innerhalb eines Ordners *Machiners*

2.3 Weitere Technologien

2.3.1 Docker

Docker ist eine Open-Source Virtualisierungstechnologie. Ihr primärer Nutzen ist das Anbieten, das Entwickeln und Verwalten von Anwendungen auf einem Serverumfeld. Dabei werden alle Services in eigenen Containern verwaltet, was es ermöglicht einzelne Teile einer Anwendung neu zu starten, sie einfach zu skalieren oder gefahrlos zu beenden. Durch die Containerisierung der Services können alle Anwendungen Betriebssystemunabhängig gehostet werden, wobei eine funktionierende Installation der Docker Engine benötigt wird.

Die Container werden immer über ein Image, einen Bauplan für einen laufenden Container, erstellt. Es können auch mehrere Container über Docker Compose Files gestartet werden, in denen alle Startparameter, sowie die verwendeten Ports des Hostsystems festgelegt werden können.

Docker hat sich im Bereich der Containersysteme durchgesetzt, da es eine zugängliche Schnittstelle zu dieser Art des Servicedeployment bietet. Durch die einfache Handhabung und den leicht zugänglichen Dockerhub, ein Image Repository in dem geprüfte und populäre Services durch nur einen Befehl heruntergeladen werden können, ist Docker die beste Lösung für diese Art des Servicemanagements geworden.

In diesem Projekt stellt Docker die beste Auswahl dar, da es bereits eine bestehende Docker Umgebung gibt, und der Prototyp später auch in dieser Umgebung laufen soll. Außerdem ermöglicht Docker den Austausch einzelner Komponenten was die Anwendung für zukünftige Anpassungen sehr offen macht.

2.3.2 MQTT

Das Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ist ein Nachrichtenprotokoll, das sich durch seine robusten Eigenschaften vor allem für unzuverlässige Umgebungen eignet. Es ist entwickelt worden, um mit Geräten mit hoher Latenz, geringer Bandbreite oder labilem Netzwerk zu kommunizieren. Es eignet sich vor allem für M2M Kommunikation und den IoT Bereich, da es besonders Akku und Leistung spart.

MQTT baut auf einer Subscribe and Publish Architektur auf. Ein Eingabegerät, beispielsweise ein Temperatursensor, erhebt seine Daten und reicht sie an einen MQTT

2.3. WEITERE TECHNOLOGIEN

Broker weiter, welcher die Daten veröffentlicht (Publish). Möchte ein Client auf die Daten zugreifen, muss er den korrekten *Topic* unter dem die Daten liegen abonnieren und erhält daraufhin alle Änderungen des Datensatzes (Subscribe).

DerMQTT Broker übernimmt das Versenden der Daten an alle Clients. Für einen Client sehen die Topics nach einer hierarchischen Struktur aus. Sollte die Verbindung zu einem Client unterbrochen werden, puffert der Broker die Veränderungen an den Daten und sendet diese, wenn der Client wieder verfügbar ist.

3 Methodik

3.1 Literaturrecherche

Die Informationen der vorangegangenen Kapitel 1 und 2 wurden aus offizieller Literatur entnommen. Zu den Informationen zu OPC UA wurden die offiziellen Spezifikationen und empfohlene Literatur der OPC Foundation verwendet. Dasselbe Vorgehen wurde für die theoretische Vorarbeit von Umati genutzt. Die meisten Informationen zum neuen Standard wurden der offiziellen Webseite des VDMA entnommen. Außerdem sind dort auch Literaturempfehlungen ausgeschrieben welche ebenfalls verwendet wurden. Um theoretische Grundlagen und Konzepterklärungen zu recherchieren, wurden Vorlesungsmaterialien der DHBW Mosbach verwendet.

3.2 Evaluation

Das Ergebnis dieser Arbeit wird ein Prototyp zur Demonstration der Umati Spezifikation sein. Dieser Prototyp muss anhand bestimmter Kriterien bewertet werden. Diese können aus dem Standard ISO 25010 für Softwarequalität entnommen werden. In Abbildung 3.1 sind die Softwarequalitätskriterien strukturiert abgebildet, wie sie im ISO-Standard definiert sind.

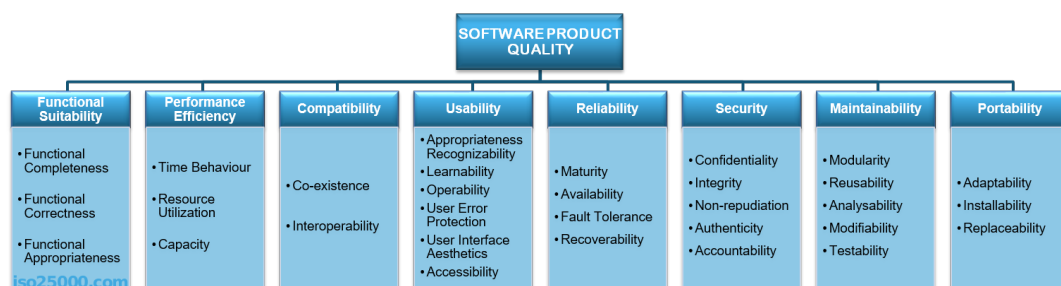


Abbildung 3.1: Softwarebewertungskriterien ISO 25010

3.3. ZEITPLANUNG

Die Punkte *Functional Suitability*, *Performance Efficiency*, *Usability* und *Reliability* sind die Hauptkriterien die für den Messeprototypen besonders wichtig sind. Die anderen Kriterien sind ebenfalls von Wichtigkeit, können jedoch den anderen nachgestellt werden, da der Prototyp nur demonstrativen Nutzen hat.

Das Demomaterial welches für die Messe ausgelegt werden soll, muss visuell anschaulich sein und die Kernfunktionen von Umati präsentieren. Es geht darum das Interesse der Messebesucher zu wecken und genug Informationen für ein allgemeines Bild über die Funktionen und Ziele von Umati zu erreichen.

3.3 Zeitplanung

Die Bearbeitungszeit dieser Arbeit sind 12 Wochen, von Montag dem 19.06.2023 bis Montag den 11.09.2023. In Abbildung 3.2 ist ein Gantt-Diagramm zur Zeitplanung abgebildet. In den ersten 4 Wochen sollen die Theoretische Grundlagen und die Analysen der Arbeit abgeschlossen sein, damit die Praxis am 10.07.2023 beginnen kann. Von Woche 5 bis 10 soll die Implementation und Integration des Prototypen stattfinden. Den gesamten Prozess kann auf gemeinsam 5 Wochen geschätzt werden, wobei eine zusätzliche Woche als Puffer eingeplant wird, sollte es Verzögerungen wie Krankheit oder Bereitstellungsschwierigkeiten geben. Am 21.08.2023 soll die Arbeit abgabebereit sein und für eine Korrekturlesung bereitgestellt werden. Parallel zur Korrekturlesung sollen die Messedokumente und Schulungsunterlagen angefertigt werden. Die letzten eineinhalb Wochen sollen dann genutzt werden, um die Arbeit zu Korrigieren.

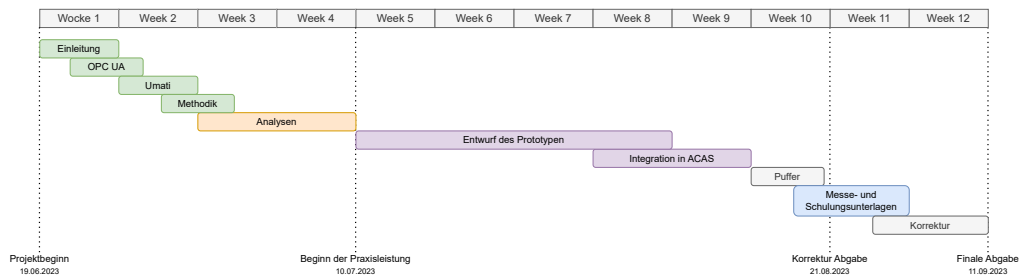


Abbildung 3.2: Gantt-Diagramm zum Projektablauf

4 Ergebnisse

4.1 Anforderungsanalyse

4.1.1 Vorgehen

Das Ziel bei der Umsetzung der Aufgabe ist es, ein Proof of Concept zu entwerfen und so die Umsetzbarkeit zu beweisen. Dabei sollen Daten an die vom VDMA zur Verfügung gestellte Webseite versendet werden und dort angezeigt werden. Das Web-Dashboard, *umati.app*, soll zeigen, dass multiple Anlagenhersteller ihre Maschinen anhand von Umati an einen Client senden können und die Informationen alle angezeigt werden. Dafür nutzt das Dashboard eine Weltkarte, auf der die Maschinen als Marker auftauchen, wo deren Informationen und Variablen genauer eingesehen werden können.

Zunächst werden allgemein die Informationen der Maschine an den Server gesendet, danach sollen Werte übertragen werden, welche sich in kurzen Abständen verändern. Es soll die Umsetzbarkeit von Methoden analysiert und das Auslesen von Daten in eine AZO Umgebung realisiert werden. Das gesamte Projekt soll in Docker umgesetzt werden, um das Projekt möglichst modular und interoperabel zu gestalten.

4.1.2 Prototyp

Als Grundlage des Umati-Prototypen soll eine Maschine simuliert werden. Es soll keine echte Maschine verwendet werden, da diese eventuell an bestimmten Zeitpunkten ausgeschaltet oder betriebsunfähig sein könnte. Außerdem ist eine reale laufende Maschine oder Anlage deutlich kostenintensiver als eine Serverbasierte Simulation. Die simulierte Maschine soll eine Anlage von AZO darstellen, die auch tatsächlich im Einsatz ist. Als Beispiel wird ein RoLog simuliert, der bei der automatischen Kleinstmengendosierung von Schüttgütern zum Einsatz kommt. In Abbildung 4.1 ist ein virtualisierter Aufbau der Anlage abgebildet. Der Roboterarm in der Mitte lagert seine Ressourcenbehälter

4.1. ANFORDERUNGSANALYSE

auf den Schränken an der Seite der Anlage, lagert neue Behälter über die Laufbänder an der Hinterseite (Oben-Links) aus oder ein und dosiert in die Ausgabe an der Front (Vorne-Rechts) des Aufbaus. [17]

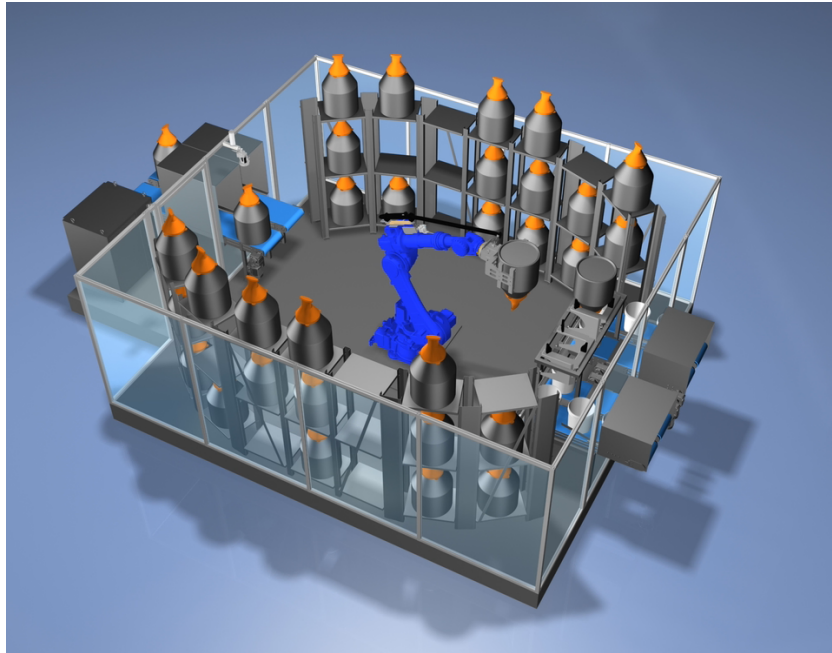


Abbildung 4.1: RoLog von AZO GmbH & Co. KG [17]

Der Prototyp soll mehrere Funktionen umsetzen. Die Umati Spezifikation soll implementiert werden und soll damit das Senden und Empfangen von Daten ermöglichen. Außerdem soll die Wirkung der Steuerungsnachrichten an die Maschine nachvollziehbar visualisiert werden. In Abbildung 4.2 sind die Anforderungen an den Prototypen abgebildet. Die Funktionalität beinhaltet dabei das der RoLog mindestens 3 Parameter absenden muss und einen Parameter lesen können muss. Es wird ein Ablauf einer Dosierung eines Rezeptes umgesetzt. Zunächst soll der RoLog durch eine Eingabe gestartet werden. Daraufhin soll er ein Rezept dosieren und einen Alarm ausgeben, wenn er fertig ist. Parallel dazu soll der Zustand der Anlage permanent übertragen werden.

Bei der Entwicklung des Prototypen soll die Umsetzbarkeit der Schnittstelle über Node-Red geprüft werden. Dies ist von Interesse da NodeRed bei AZO bereits breitgefächert für die M2M Kommunikation angewandt wird.

4.2. LÖSUNGSANSATZ

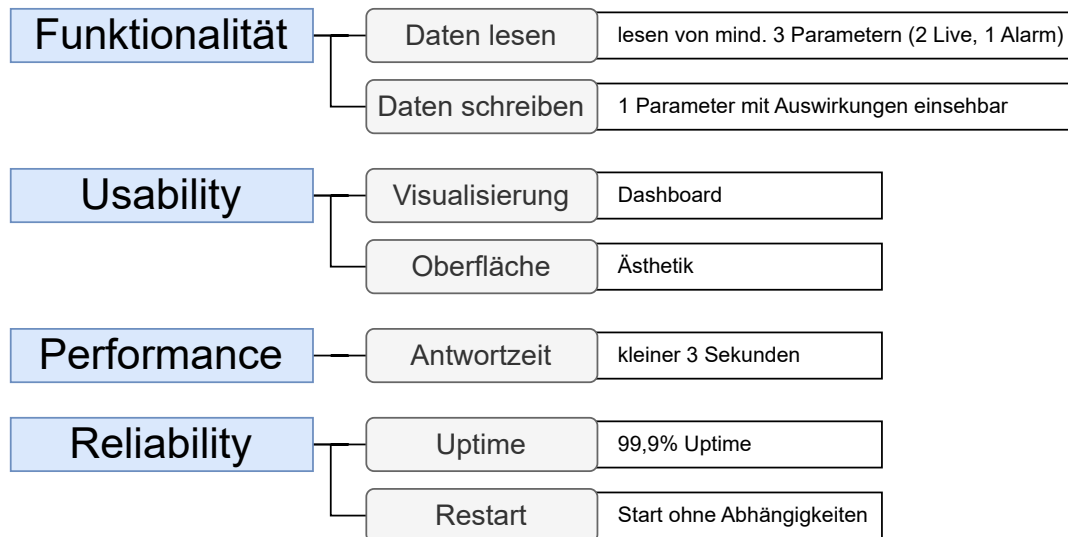


Abbildung 4.2: wichtigste Bewertungskriterien des Prototypen

4.2 Lösungsansatz

4.2.1 Struktur

Das Ziel ist eine AZO Maschine auf der umati Demonstrationsseite (<https://umati.app>) anzuzeigen. In Abbildung ?? wird die Struktur des Datenaustausches mit der umati Webseite bildlich dargestellt. Die Daten entstehen in der Simulation des RoLogs, der AZO Maschine. Dieser stellt einen Roboter dar, dessen OPC UA Server die Robotics Spezifikation implementieren soll (OPC 40010). Umati empfängt Daten über einen MQTT Server und synchronisiert diese Daten dann mit dem umati.app Dashboard. Um aus dem OPC UA Server die Daten an den in der Cloud befindlichen MQTT Server zu senden, kann ein vorgefertigter Dockercontainer der VDMA verwendet werden, um den Transport zu übernehmen. Der Datenbroker kann auf dem umati Github Repository gefunden werden.

Andere Firmen können ihre Daten über den selben Prozess auf das umati Dashboard laden. So entsteht eine Demonstration das eine Oberfläche die Möglichkeit besitzt, Maschinendaten aus verschiedensten Quellen un Herstellern integrieren kann.

Sind die Daten auf dem Umati Server können sie anhand der von VDMA gesendeten Anmeldedaten über einen MQTT Client gelesen werden und daraufhin in das lokale MES System integriert werden.

4.2.2 OPC UA Server - DataFeed

4.2.3 Eigenimplementierung

High-Code

Low-Code

4.3 Marktanalyse

4.4 Wirtschaftlichkeit und Projektanalyse

4.4.1 Kostenplanung

4.4.2 Fallbeispiel

4.5 Implementierung eines Prototyps

4.5.1 Struktur

Der VDMA und VDA, die Operatoren von Umati, haben eine Kollektion von Repositories auf Github, auf welchen multiple Implementationsmöglichkeiten eines Umati Servers dargestellt sind. [19] All diese Projekte sind bereits auf Vollständigkeit geprüft und garantieren so die volle umsetzen der Umati-Standards, oder zumindest einer angegebenen Umati Spezifikation. Beispielsweise kann ein Sample-Server verwendet werden, um einen Umatiserver aufzusetzen, der pseudo-zufällige Werte generiert und diese zur Abfrageung bereit stellt. Dieses Repository implementiert zum Zeitpunkt der Abfrage im August 2023 die Spezifikationen *Machine Tool*, *Woodworking*, *Geometrical Measurement Systems* und *Additive Manufacturing* und simuliert Maschinen, welche die notwendigen und optionalen Variablen implementieren, die sie festlegen.

Dieses Verzeichnis beinhaltet auch weitere Implementierungen von Demonstrationsservern in verschiedenen Programmiersprachen und mit abweichenden Companionspezifikationen von umati. Für dieses Projekt sind vor allem der Sample-Server-node-opcua und Dashboard-OPCUA-Client von relevanz.

Der Sample Server stellt mit Standardeinstellungen einen OPC UA Server zur verfügung, der mehrere Maschinen im Hintergrund nach den verschiedenen Spezifikationen simuliert. Es existiert Beispielsweise ein Simulation, die einen Roboter darstellt, der seine

4.5. IMPLEMENTIERUNG EINES PROTOTYPS

die Geschwindigkeit und die Position des Arms mit pseudo-zufälligen Werten beschreibt und in kurzen Abständen ändert. Das Dashboard fungiert als Übersetzer zwischen dem MQTT Broker welcher umati.app nutzt und dem zuvor OPC UA Server, welcher die Maschine simuliert.

Die Daten der simulierten Maschine soll auf die umati.app des VDMA gestreamt werden und dort genau wie die bereits vorhandenen Maschinen angezeigt werden. Dafür müssen die Daten in einen MQTT Server gespeichert werden, welcher dann im Hintergrund die Kommunikation mit der Webanwendung übernimmt.

In Abbildung 4.3 wird der Datenfluss visuell abgebildet. Die Daten entstehen in der Simulation des RoLogs, welcher einen OPC UA Server nutzt, um seine Daten zu versenden. Dank der Implementierung der umati Spezifikation kann der OPC UA Client des VDMA den RoLog erkennen und dessen Daten an den MQTT Server der umati.app weiterleiten. Dort werden die Daten so verarbeitet, dass sie auf dem Dashboard im Internet angezeigt werden können. Andere Teilnehmer an dem Projekt können über den selben Prozess ihre Daten an den MQTT Server senden, und so entsteht Dashboard, mit mehreren Maschinen von verschiedensten Anbietern.

Der MQTT Server der umati.app kann auch abonniert werden, um die Daten in ein eigenes Projekt zu überführen. Alternativ, um den Weg über das Internet zu vermeiden kann der OPC UA Client des VDMA auch umkonfiguriert werden, um auf einen lokalen MQTT Server zu senden.

4.5. IMPLEMENTIERUNG EINES PROTOTYPS

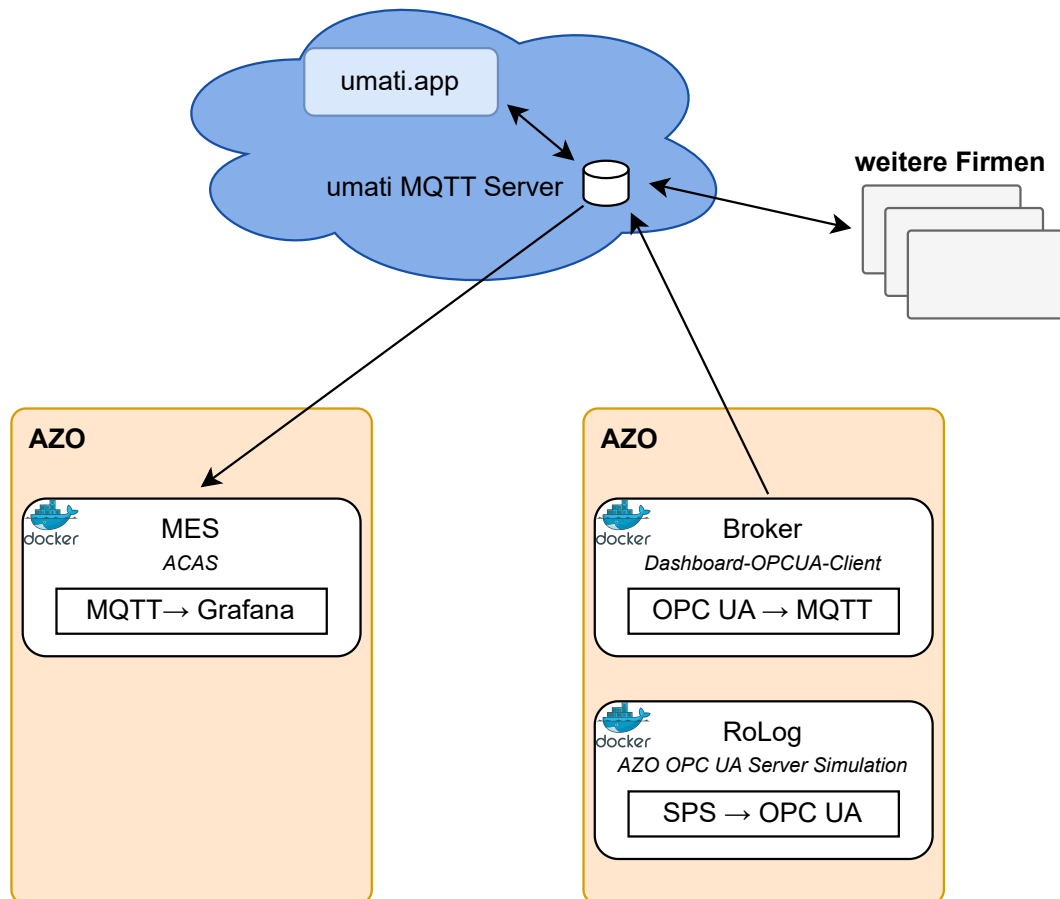


Abbildung 4.3: Datenfluss und Struktur des Prototypen

4.5.2 Sicherheit

Die Demonstration über die Umati Webapplikation dient nur Messezwecken und sollte nicht für die Produktion verwendet werden. Der Aufbau einer Umati Umgebung sollte in einem lokalen Umfeld passieren, mit den maximalen Authentifizierungsmöglichkeiten die umati zulässt.

4.5.3 OPC UA Server

Der OPC UA Server besteht aus zwei Komponenten. Der Simulation des Roboters und die Implementierung der Umati Spezifikation OPC 40010 - Robotics. Um den OPC UA Server zu Verfügung zu stellen wurden mehrere Ansätze verwendet die in diesem Kapitel diskutiert werden. Die für diese Arbeit am besten geeignete Lösung ist die Verwendung

4.5. IMPLEMENTIERUNG EINES PROTOTYPS

eines Sample Server Forks des umati Repositories der mit den Daten eines RoLogs oder zu simulierenden Maschine beschrieben wird.

dataFeed Server

DataFeed wurde von Softing Industrial Automation GmbH entwickelt welche ein „All-in-One“-Datenintegrationslösung für die OPC UA-Kommunikation anbieten.

Mit dem dataFeed Tool können einfache OPC UA Server implementiert werden, welche Variablen und einzelne Attribute übermitteln können. Umati verlangt eine Objekt-basierte Strukturierung der Daten, welche anhand der limitierten von dataFeed nicht umsetzbar ist.

Eigenimplementierung

Sample Server - Umati

4.5.4 OPC UA Client

4.5.5 MQTT Broker

4.5.6 Integration in bestehende Infrastruktur

5 Diskussion und Fazit

Literatur

- [1] Yinzhe Bao, Weimin Zhang und Ziwei Jia. *5G-based Cloud Learning Factory in AMTC*. en. SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY, Feb. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4072330. URL: <https://papers.ssrn.com/abstract=4072330> (besucht am 21.06.2023).
- [2] Wolfgang Mahnke, Stefan-Helmut Leitner und Matthias Damm. *OPC unified architecture*. eng. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-68898-3 978-3-642-08842-1.
- [3] Jürgen Lange, Frank Iwanitz und Thomas J. Burke. *OPC: von Data Access bis Unified Architecture*. ger. 4., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Berlin Offenbach: VDE Verlag, 2010. ISBN: 978-3-8007-3217-3.
- [4] *UA Part 2: Security*. en. URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/view/159> (besucht am 23.06.2023).
- [5] *Der Verband - VDMA - vdma.org - VDMA*. URL: <https://www.vdma.org/der-verband> (besucht am 26.06.2023).
- [6] *Themenübersicht - vdma.org - VDMA*. URL: <https://www.vdma.org/themen> (besucht am 26.06.2023).
- [7] *umati Broschüre*. en. Apr. 2023. URL: <https://www.vdma.org/documents/34570/0/Umati%20Info-Brosch%C3%BCre.pdf/c1334bd5-73dc-2496-735f-7cea052fc290> (besucht am 26.06.2023).
- [8] Alexandra Rinke. *Was ist OPC UA? Die wichtigsten Begriffe im Überblick*. de-DE. Apr. 2022. URL: <https://www.opc-router.de/was-ist-opc-ua/> (besucht am 26.06.2023).
- [9] Dr. Jörg Mielebacher. *Verteilte Systeme; Automatisierung*. de. Vorlesung. 2021.
- [10] Dr. Jörg Mielebacher. *Verteilte Systeme; Interoperabilität*. de. Vorlesung. 2021.

- [11] *About - umati - universal machine technology interface*. en-US. URL: <https://umati.org/about/> (besucht am 27.06.2023).
- [12] *Machinery - umati - universal machine technology interface*. en-US. URL: https://umati.org/industries_machinery/ (besucht am 27.06.2023).
- [13] *Unified Architecture*. en-US. URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (besucht am 29.06.2023).
- [14] *OPC UA Sicherheitskonzept*. URL: <https://www.ascolab.com/de/unified-architecture/sicherheit.html> (besucht am 29.06.2023).
- [15] Damm u. a. *OPC UA Security Analysis*. März 2017. URL: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/OPCUA/OPCUA.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (besucht am 29.06.2023).
- [16] Christa Weßel. *Semi-strukturierte Interviews im Software-Engineering: Indikationsstellung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung – Ein Fall-basiertes Tutorium*. de. Gesellschaft für Informatik e.V., 2010. ISBN: 978-3-88579-270-3. URL: <https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/19348> (besucht am 10.07.2023).
- [17] *AZO RoLog® / automatische Kleinstmengendosierung*. URL: <https://www.azo.com/de-de/portfolio/azo-rolog> (besucht am 11.07.2023).
- [18] *2022 Industrial Network Market Shares according to HMS Networks / Industrial Ethernet Book*. en-US. URL: <https://iebmedia.com/news/tech-updates/2022-industrial-network-market-shares-according-to-hms-networks/> (besucht am 11.07.2023).
- [19] *GitHub: umati - universal machine technology interface*. en. URL: <https://github.com/umati> (besucht am 17.07.2023).

text