

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Vorwort .....                                                               | 3  |
| Kurzfassung.....                                                            | 5  |
| Abstract .....                                                              | 7  |
| Inhaltsverzeichnis.....                                                     | 9  |
| Abkürzungen .....                                                           | 13 |
| Abbildungsverzeichnis.....                                                  | 15 |
| Tabellenverzeichnis.....                                                    | 17 |
| 1 Einleitung.....                                                           | 19 |
| 2 Begriffsdefinitionen und Anforderungen.....                               | 21 |
| 2.1 Begriffe aus der Informations- und Softwaretechnik .....                | 21 |
| 2.2 Begriffe aus der Produktionstechnik .....                               | 22 |
| 3 Stand der Technik und Wissenschaft.....                                   | 23 |
| 3.1 Grundlagen der Kommunikation in Informations- und Produktionstechnik..  | 23 |
| 3.1.1 Historie und Zusammenhang von IT, Software- und Produktionstechnik .. | 23 |
| 3.1.2 OSI Referenzmodell.....                                               | 24 |
| 3.1.3 Netzwerk-Topologien .....                                             | 26 |
| 3.1.4 Industrielle Kommunikation (OT Kommunikation).....                    | 28 |
| 3.1.5 IT Kommunikation.....                                                 | 33 |
| 3.2 Serviceorientierte Architektur .....                                    | 34 |
| 3.2.1 Grundlagen von SOA.....                                               | 34 |
| 3.2.2 Entwurfsprinzipien von SOA.....                                       | 36 |
| 3.2.3 Aufbau von SOA und das SOA-Dreieck .....                              | 38 |
| 3.2.4 Serviceverzeichnis .....                                              | 39 |
| 3.2.5 Einsatzgebiete von SOA .....                                          | 39 |
| 3.3 Einfluss durch Industrie 4.0 auf die Kommunikationstechnik .....        | 40 |
| 3.3.1 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 .....                         | 40 |
| 3.3.2 Software Defined Manufacturing .....                                  | 42 |
| 3.3.3 Paradigmenwechsel in der Kommunikation .....                          | 44 |
| 3.3.4 OPC UA als Kommunikationsstandard .....                               | 46 |
| 3.4 Zusammenfassung und Defizite aus Stand der Technik und Wissenschaft ... | 51 |
| 3.5 Zielsetzung dieser Arbeit.....                                          | 53 |

|       |                                                                                       |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4     | Vergleich von Technologien und Lösungen für Verzeichnisdienste.....                   | 57 |
| 4.1   | Lösungen für Verzeichnisdienste .....                                                 | 58 |
| 4.1.1 | Office-IT .....                                                                       | 58 |
| 4.1.2 | Produktions-IT .....                                                                  | 62 |
| 4.2   | Nutzbare Technologien für Verzeichnisdienste .....                                    | 66 |
| 4.2.1 | Office-IT .....                                                                       | 66 |
| 4.2.2 | Produktions-IT .....                                                                  | 73 |
| 4.2.3 | Remote Procedure Calls – COM & DCOM .....                                             | 74 |
| 4.3   | Vergleichsmerkmale .....                                                              | 75 |
| 4.3.1 | Verbreitung .....                                                                     | 75 |
| 4.3.2 | Aktualität .....                                                                      | 75 |
| 4.3.3 | Entwicklungsreife (Reife).....                                                        | 76 |
| 4.3.4 | Quellcodeverfügbarkeit (Quellcode) .....                                              | 77 |
| 4.3.5 | Unterstützte Betriebssysteme (Kompatibilität).....                                    | 77 |
| 4.3.6 | Sicherheit .....                                                                      | 78 |
| 4.3.7 | Kosten .....                                                                          | 79 |
| 4.3.8 | Standardisierung .....                                                                | 79 |
| 4.3.9 | Einsatzzweck .....                                                                    | 79 |
| 4.4   | Bewertung von Lösungen.....                                                           | 80 |
| 4.4.1 | Active Directory .....                                                                | 80 |
| 4.4.2 | OpenLDAP .....                                                                        | 81 |
| 4.4.3 | OPC UA LDS-ME.....                                                                    | 83 |
| 4.4.4 | OPC UA .NET-GDS.....                                                                  | 85 |
| 4.5   | Bewertung von Implementierungen nutzbarer Technologien .....                          | 86 |
| 4.5.1 | Bonjour .....                                                                         | 86 |
| 4.5.2 | LDAP .....                                                                            | 88 |
| 4.5.3 | jabberd2 .....                                                                        | 88 |
| 4.5.4 | OPC UA – open62541 .....                                                              | 89 |
| 4.5.5 | Unified Automation C++ based OPC UA SDK .....                                         | 90 |
| 4.5.6 | COM/DCOM .....                                                                        | 92 |
| 4.6   | Zusammenfassung und Entwurfsentscheidung .....                                        | 93 |
| 5     | Architektur eines Verzeichnisdienstes für serviceorientierte Produktionstechnik ..... | 95 |
| 5.1   | Systemarchitektur.....                                                                | 95 |
| 5.1.1 | Systemübersicht .....                                                                 | 95 |
| 5.1.2 | Übersicht der Komponenten und Kommunikation .....                                     | 98 |

|       |                                                                                             |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2   | Systementwurf.....                                                                          | 100 |
| 5.2.1 | Informationsmodell.....                                                                     | 101 |
| 5.2.2 | Abbildung von CPS Fähigkeiten .....                                                         | 103 |
| 5.2.3 | Verzeichnisdienst Server Logik.....                                                         | 105 |
| 5.2.4 | Verzeichnisdienst Client Logik.....                                                         | 106 |
| 5.2.5 | LDAP-Connector .....                                                                        | 108 |
| 5.3   | Integration bestehender Companion Specifications .....                                      | 108 |
| 5.4   | Zusammenfassung .....                                                                       | 110 |
| 6     | Integration in vorherrschende IT Strukturen .....                                           | 111 |
| 6.1   | Übersicht von OPC UA Knoten und Zusammenhang mit Namensräumen ..                            | 111 |
| 6.2   | Ansätze zur Abbildung von OPC UA-Servern in LDAP .....                                      | 113 |
| 6.2.1 | Knoten als Liste unterhalb deren Namensräume .....                                          | 113 |
| 6.2.2 | Knoten als Baum unterhalb deren Namensräume.....                                            | 114 |
| 6.2.3 | Knoten als Baum außerhalb deren Namensräume .....                                           | 115 |
| 6.3   | Vergleich der Ansätze .....                                                                 | 115 |
| 6.4   | Mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten.....                                              | 117 |
| 6.5   | LDAP-Schema für OPC UA.....                                                                 | 118 |
| 6.5.1 | Abbildung der OPC UA-Informationen.....                                                     | 118 |
| 6.5.2 | Erweiterung für mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten .....                             | 121 |
| 6.6   | Zusammenfassung .....                                                                       | 122 |
| 7     | Anwendung und Realisierung.....                                                             | 123 |
| 7.1   | Vorstellung des Anwendungsfalls: Wandlungsfähige Montagetechnik – CESA <sup>3</sup> R ..... | 124 |
| 7.2   | Abbilden von Fähigkeiten in Informationsmodellen und Kommunikationsarchitektur .....        | 125 |
| 7.3   | Integration in CESA <sup>3</sup> R Architektur .....                                        | 128 |
| 7.4   | Einsatz des Verzeichnisdienstes in der wandlungsfähige Montagetechnik..                     | 129 |
| 8     | Zusammenfassung und Ausblick.....                                                           | 133 |
| 9     | Anhang.....                                                                                 | 135 |
| 9.1   | CVE-Bewertungen und Mittelwertberechnung.....                                               | 135 |
| 9.2   | Entworfenes LDAP-Schema für OPC UA .....                                                    | 136 |
| 10    | Literaturverzeichnis .....                                                                  | 141 |