

## II. Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                        |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| I.    | Vorwort.....                                                           | i   |
| II.   | Inhaltsverzeichnis.....                                                | iii |
| III.  | Abkürzungsverzeichnis.....                                             | vi  |
| IV.   | Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....                               | xi  |
| 1     | Einleitung.....                                                        | 1   |
| 1.1   | Problemstellung.....                                                   | 2   |
| 1.2   | Zielsetzung und Forschungsansatz.....                                  | 3   |
| 1.3   | Vorgehensweise.....                                                    | 5   |
| 2     | Grundlagen.....                                                        | 6   |
| 2.1   | Prozessindustrie.....                                                  | 6   |
| 2.1.1 | Abgrenzung der Prozessindustrie.....                                   | 6   |
| 2.1.2 | Produktivitätssteigerung in der Prozessindustrie.....                  | 12  |
| 2.1.3 | IT-Systeme in der Prozessindustrie.....                                | 19  |
| 2.2   | Maschinelles Lernen und Data Mining.....                               | 28  |
| 2.2.1 | Grundlegende Begrifflichkeiten und Vorgehensweisen.....                | 28  |
| 2.2.2 | Lernverfahren und Aufgabenstellungen.....                              | 32  |
| 2.2.3 | Überwachtes Lernen.....                                                | 34  |
| 2.2.4 | Unüberwachtes Lernen.....                                              | 40  |
| 2.2.5 | Semi-überwachtes Lernen.....                                           | 46  |
| 2.2.6 | Bestärkendes Lernen.....                                               | 46  |
| 2.2.7 | Anwendungsgebiete in der Produktion.....                               | 47  |
| 2.3   | Industrie 4.0 und Internet of Things.....                              | 48  |
| 2.3.1 | Grundlegende Begrifflichkeiten und Zusammenhänge.....                  | 48  |
| 2.3.2 | Embedded Systems und Edge Devices.....                                 | 49  |
| 2.3.3 | Industrial Internet of Things und Referenzarchitekturen.....           | 52  |
| 2.3.4 | Schnittstellen und Protokolle.....                                     | 56  |
| 2.4   | Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....                               | 59  |
| 3     | Stand der Forschung.....                                               | 62  |
| 3.1   | Maschinelles Lernen in der Prozessindustrie.....                       | 62  |
| 3.1.1 | Anwendungsgebiete von maschinellem Lernen in der Prozessindustrie..... | 62  |

|       |                                                                                      |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.2 | Verbreitete Verfahren und Algorithmen in der Prozessindustrie .....                  | 64  |
| 3.2   | Architekturen für maschinelles Lernen.....                                           | 65  |
| 3.2.1 | Software-Architekturen und -Frameworks .....                                         | 65  |
| 3.2.2 | Machine Learning Operations .....                                                    | 69  |
| 3.2.3 | Anwendungsgetriebene Architekturen .....                                             | 71  |
| 3.3   | Zusammenfassung und Konkretisierung der Forschungslücke.....                         | 80  |
| 4     | Konzeption einer Referenzarchitektur für maschinelles Lernen in der Prozessindustrie | 82  |
| 4.1   | Zielsetzung und Spezifizierung des Referenzarchitektur-Typs .....                    | 84  |
| 4.1.1 | Zielsetzung.....                                                                     | 84  |
| 4.1.2 | Spezifizierung des Referenzarchitektur-Typs .....                                    | 84  |
| 4.2   | Auswahl und Analyse der Informationsquellen .....                                    | 85  |
| 4.2.1 | Identifikation von Quellen und Personen .....                                        | 85  |
| 4.2.2 | Dokumentation und Aufnahme der Informationen .....                                   | 86  |
| 4.2.3 | Definition von Stakeholdern.....                                                     | 87  |
| 4.3   | Anforderungsdefinition .....                                                         | 89  |
| 4.3.1 | Inhaltliche Anforderungen .....                                                      | 89  |
| 4.3.2 | Grobkonzept des Aufbaus.....                                                         | 91  |
| 4.4   | Aufbau der Architektur.....                                                          | 91  |
| 4.5   | Sicht I: Ausprägung der Ebenen.....                                                  | 95  |
| 4.5.1 | Asset.....                                                                           | 95  |
| 4.5.2 | IT Systems .....                                                                     | 98  |
| 4.5.3 | Edge Device.....                                                                     | 101 |
| 4.5.4 | Network Infrastructure and Databases .....                                           | 104 |
| 4.5.5 | Machine Learning.....                                                                | 107 |
| 4.5.6 | Application .....                                                                    | 124 |
| 4.6   | Sicht II: Nutzung der Architektur.....                                               | 125 |
| 4.6.1 | Business Understanding .....                                                         | 126 |
| 4.6.2 | Data Understanding .....                                                             | 127 |
| 4.6.3 | Data Preparation .....                                                               | 128 |
| 4.6.4 | Modeling .....                                                                       | 129 |
| 4.6.5 | Evaluation .....                                                                     | 130 |
| 4.6.6 | Deployment.....                                                                      | 131 |
| 4.7   | Diskussion und Zusammenfassung.....                                                  | 132 |

|       |                                                                            |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5     | Exemplarische Umsetzung und Validierung .....                              | 133 |
| 5.1   | ML-basierte Rezeptoptimierung in Cyber-Physischer Versuchsbrauerei .....   | 133 |
| 5.1.1 | Asset.....                                                                 | 134 |
| 5.1.2 | IT Systems .....                                                           | 136 |
| 5.1.3 | Edge Device.....                                                           | 137 |
| 5.1.4 | Network Infrastructure and Databases .....                                 | 139 |
| 5.1.5 | Machine Learning.....                                                      | 140 |
| 5.1.6 | Application .....                                                          | 146 |
| 5.2   | Industrielle Umsetzung in der Getränkeindustrie .....                      | 148 |
| 5.2.1 | Asset.....                                                                 | 148 |
| 5.2.2 | IT Systems.....                                                            | 149 |
| 5.2.3 | Network Infrastructure and Databases .....                                 | 149 |
| 5.2.4 | Machine Learning.....                                                      | 150 |
| 5.2.5 | Application .....                                                          | 151 |
| 5.3   | Evaluation der Umsetzungen .....                                           | 152 |
| 5.4   | Evaluation der übergeordneten Ziele durch Befragung von Stakeholdern ..... | 153 |
| 6     | Zusammenfassung und Ausblick.....                                          | 154 |
| 6.1   | Zusammenfassung.....                                                       | 154 |
| 6.2   | Weiterer Forschungsbedarf .....                                            | 155 |
| 7     | Anhang.....                                                                | 157 |
| 7.1   | Grundlagen und Stand der Technik.....                                      | 157 |
| 7.2   | Konzeption der Referenzarchitektur .....                                   | 158 |
| 7.2.1 | Device Management (Geräteverwaltung).....                                  | 159 |
| 7.2.2 | Decentral Data Acquisition and Pre-Processing .....                        | 160 |
| 7.2.3 | Decentral Data Storage (Dezentrale Datenspeicherung).....                  | 161 |
| 7.2.4 | Decentral Scoring (Dezentrale Ausführung von Scoring-Prozessen).....       | 162 |
| 7.3   | Exemplarische Umsetzung und Validierung .....                              | 163 |
| 7.4   | Interviewstudie zur Evaluation der übergeordneten Ziele .....              | 170 |
| 8     | Literaturverzeichnis .....                                                 | 171 |