

# Inhaltsverzeichnis

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis</b>               | <b>ix</b>   |
| <b>Bildverzeichnis</b>                                        | <b>xiii</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                    | <b>xix</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>                                           | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation und Problemstellung                            | 2           |
| 1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit                    | 3           |
| <b>2 Stand der Forschung</b>                                  | <b>5</b>    |
| 2.1 Produktentwicklungsprozess                                | 5           |
| 2.1.1 VDI 2221/23                                             | 7           |
| 2.1.2 Formate                                                 | 10          |
| 2.1.3 Datengetriebene Produktentwicklung                      | 16          |
| 2.2 Datengetriebene Methoden                                  | 21          |
| 2.2.1 Übersicht Machine-Learning                              | 22          |
| 2.2.2 Objekterkennung (Bilder)                                | 28          |
| 2.2.3 Geometrie und Machine-Learning                          | 41          |
| 2.2.4 Verknüpfung von Skizzen und Geometrie                   | 60          |
| <b>3 Handlungsbedarf und Vorgehensweise</b>                   | <b>63</b>   |
| 3.1 Handlungsbedarf                                           | 63          |
| 3.2 Hypothese und Forschungsfragen                            | 65          |
| 3.3 Vorgehensweise                                            | 66          |
| <b>4 Erkennung und Kontextualisierung technischer Skizzen</b> | <b>69</b>   |
| 4.1 Modulübersicht                                            | 69          |
| 4.2 Symbolerkennung                                           | 69          |
| 4.2.1 Trainingsdatenerzeugung                                 | 70          |
| 4.2.2 Objekterkennungsmodelle                                 | 74          |
| 4.3 Anwendung der Symbolerkennung                             | 74          |
| 4.3.1 Implementierung der Objekterkennungsmodelle             | 74          |
| 4.3.2 Auswertemetriken und Testdatensätze                     | 75          |
| 4.3.3 Ergebnisse                                              | 77          |
| 4.3.4 Auswertung                                              | 79          |
| 4.4 Iteration Symbolerkennung                                 | 82          |

|       |                                                                             |            |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5   | Kontextualisierung . . . . .                                                | 83         |
| 4.5.1 | Transformation in Graphen . . . . .                                         | 84         |
| 4.5.2 | Ähnlichkeitssuche . . . . .                                                 | 86         |
| 4.5.3 | SysML Überführung . . . . .                                                 | 89         |
| 4.5.4 | Weitere Anwendungsmöglichkeiten . . . . .                                   | 90         |
| 4.6   | Diskussion . . . . .                                                        | 91         |
| 5     | <b>Ähnlichkeitssuche von Baugruppen mittels Skizzen . . . . .</b>           | <b>93</b>  |
| 5.1   | Modulübersicht . . . . .                                                    | 94         |
| 5.1.1 | Kontaktgraph . . . . .                                                      | 95         |
| 5.1.2 | Bauteilerkennung . . . . .                                                  | 97         |
| 5.1.3 | Graphaufbereitung und -matching . . . . .                                   | 101        |
| 5.2   | Anwendung an Demonstratordatensätzen . . . . .                              | 107        |
| 5.2.1 | Auswertemetriken . . . . .                                                  | 107        |
| 5.2.2 | Getriebestufen-Datensatz . . . . .                                          | 108        |
| 5.2.3 | Baugruppen-Datensatz . . . . .                                              | 115        |
| 5.3   | Diskussion . . . . .                                                        | 120        |
| 6     | <b>Ähnlichkeitssuche für Bauteile . . . . .</b>                             | <b>121</b> |
| 6.1   | Modulübersicht . . . . .                                                    | 122        |
| 6.1.1 | Datenaufbereitung . . . . .                                                 | 123        |
| 6.1.2 | Objektabstraktion . . . . .                                                 | 126        |
| 6.1.3 | Shape-Deskriptor-Erzeugung . . . . .                                        | 126        |
| 6.2   | Untersuchung der Einflussfaktoren auf die<br>Retrievalgenauigkeit . . . . . | 128        |
| 6.2.1 | Bauteilausrichtung . . . . .                                                | 129        |
| 6.2.2 | Featureextraktion . . . . .                                                 | 131        |
| 6.2.3 | Projektionsart und Distanzmetrik . . . . .                                  | 132        |
| 6.2.4 | Dimensionsreduktion . . . . .                                               | 134        |
| 6.3   | Vergleich mit Stand der Technik Verfahren . . . . .                         | 136        |
| 6.3.1 | Vergleich mit eigenen Vorarbeiten . . . . .                                 | 136        |
| 6.3.2 | Vergleich mit etablierten Verfahren . . . . .                               | 137        |
| 6.4   | Diskussion . . . . .                                                        | 139        |
| 7     | <b>Anwendungsszenario . . . . .</b>                                         | <b>141</b> |
| 7.1   | Szenario Vorstellung . . . . .                                              | 141        |
| 7.2   | Konzeptphase . . . . .                                                      | 142        |
| 7.3   | Entwurfsphase . . . . .                                                     | 144        |
| 7.4   | Diskussion . . . . .                                                        | 146        |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                      | <b>149</b> |
| <b>9</b> | <b>Summary and Outlook</b>                                               | <b>153</b> |
|          | <b>Anhang</b>                                                            | <b>157</b> |
| <b>A</b> | <b>Ergänzungen zu Kapitel 2</b>                                          | <b>157</b> |
| A.1      | Auswertung Objekterkennung - Beispiel                                    | 157        |
| A.2      | Auswertung Ähnlichkeitssuche - Beispiel                                  | 158        |
| A.3      | Convolutional Neural Network - Erklärung                                 | 159        |
| A.4      | Datensätze - Übersicht                                                   | 161        |
| A.4.1    | MCB                                                                      | 161        |
| A.4.2    | ESB                                                                      | 162        |
| A.5      | Auswertemetriken Klassifikation - Übersicht                              | 163        |
| A.6      | Auswertemetriken Klassifikation - ROC Diagramm                           | 164        |
| A.7      | MCB Datensatz - Vergleichsergebnisse                                     | 164        |
| A.8      | Ähnlichkeitssuche - Literaturübersicht                                   | 165        |
| A.9      | Ähnlichkeitssuche - Stand der Technik-Verfahren                          | 174        |
| A.10     | Symbolerkennung - Literaturübersicht                                     | 176        |
| <b>B</b> | <b>Ergänzungen zu Kapitel 4</b>                                          | <b>187</b> |
| B.1      | Datenerzeugung - Algorithmen                                             | 187        |
| B.1.1    | Pillow                                                                   | 187        |
| B.1.2    | SketchGraph                                                              | 188        |
| B.2      | Datensätze - Übersicht                                                   | 189        |
| B.2.1    | Getriebestufen                                                           | 189        |
| B.2.2    | Übersicht aller Bilder                                                   | 190        |
| B.2.3    | Unbekannte Baugruppen                                                    | 195        |
| B.2.4    | Übersicht aller Bilder                                                   | 196        |
| B.2.5    | Übersicht der Bewertungsmetriken für beide Test-Datensätze               | 200        |
| B.2.6    | Häufigkeit der Symbole für die Iteration der Sketch-Graph Datenerzeugung | 201        |
| B.2.7    | Parameter und Ergebnisse für GED-Skizzen - Vergleich                     | 202        |
| <b>C</b> | <b>Ergänzungen zu Kapitel 5</b>                                          | <b>203</b> |
| C.1      | Formel für Projektion                                                    | 203        |
| C.2      | PointNet++                                                               | 203        |
| C.3      | Demonstrator-Datensatz Skizze - Baugruppe                                | 205        |

- C.4 Pseudocode Graphaufbereitung . . . . . 210
- C.5 Demonstrator-Datensatz - Baugruppe . . . . . 215
- C.6 Vergleich Bauteilerkennung . . . . . 226
- C.7 Vergleich Projektion - Stand der Technik . . . . . 227
- C.8 Ergebnis automatisierte Bauteilerkennung . . . . . 228
- C.9 Regel für Baugruppen . . . . . 229
- C.10 Scores für Baugruppen-Datensatz . . . . . 232
- D Ergänzungen zu Kapitel 6 . . . . . 237**
  - D.1 Ähnlichkeitssuche Bauteile . . . . . 237
    - D.1.1 Einfluss der Anzahl an Punkten pro Sampling . . . . . 239
    - D.1.2 Übersicht Studie Dimensionreduktionsgröße . . . . . 240
    - D.1.3 Siamese Network . . . . . 245
- E Ergänzungen zu Kapitel 7 . . . . . 247**
  - E.1 Datensätze . . . . . 247
  - E.2 Suchergebnisse GED-Distanz - Prinzipskizzen . . . . . 248
- Literaturverzeichnis . . . . . 249**