

## Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung  | 1  |
| 1.1   | Ausgangssituation   | 1  |
| 1.2   | Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit         | 1  |
| 1.3   | Ansatz und Vorgehen zur Erreichung der Ziele                      | 3  |
| 1.4   | Aufbau der Arbeit   | 5  |
| 2     | Leichtbau   | 7  |
| 2.1   | Faserverbundkunststoffe   | 10 |
| 2.2   | Verstärkungsfasern  | 12 |
| 2.3   | Halbzeuge   | 16 |
| 2.4   | Fertigungsverfahren für faserverstärkte Strukturauteile           | 22 |
| 2.5   | Anwendung künstlicher Intelligenz in der Faserverbundbranche      | 34 |
| 2.6   | Zusammenfassung   | 37 |
| 3     | Planung und Gestaltung von Prozessketten                          | 38 |
| 3.1   | Planungsansätze in der Faserverbundbranche                        | 40 |
| 3.1.1 | Vier-Stufen-Methodik nach GRUNDMANN                               | 41 |
| 3.1.2 | Sechs-Stufen-Methodik nach GREB                                   | 42 |
| 3.1.3 | Vier-Stufen-Methodik nach GÖTZFRIED                               | 43 |
| 3.1.4 | Weitere Unterstützungsansätze und -systeme im Faserverbundbereich | 44 |
| 3.2   | Planungsansätze aus anderen Branchen und Bereichen                | 45 |
| 3.2.1 | Produktionstechnik  | 46 |
| 3.2.2 | Informationstechnik   | 47 |
| 3.2.3 | Logistik  | 49 |
| 3.3   | Bewertung der vorgestellten Ansätze                               | 50 |
| 4     | Zielstellung und methodisches Vorgehen                            | 60 |
| 5     | Verfahrensauswahl durch Geometrieklassifizierung                  | 64 |
| 5.1   | Definition der Geometrieklassen                                   | 64 |
| 5.2   | Auswahl des Klassifizierungsansatzes                              | 67 |
| 5.3   | Verwendeter Datensatz und Hyperparameteroptimierung               | 69 |
| 5.4   | Training und Validierung der Neuronalen Netze                     | 72 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.5 Zusammenfassung                                     | 77         |
| <b>6 Scheduling von Prozessmodulen</b>                  | <b>79</b>  |
| 6.1 Makespan-Minimierung                                | 82         |
| 6.2 Minimierung der Leerlaufzeiten                      | 84         |
| 6.3 Kumulations-Ansatz                                  | 85         |
| 6.4 Validierung und Evaluation der Modelle              | 86         |
| 6.5 Zusammenfassung                                     | 88         |
| <b>7 Vorgehen zur methodischen Prozesskettenplanung</b> | <b>91</b>  |
| <b>8 Anforderungen an eine Planungs-Software</b>        | <b>99</b>  |
| <b>9 Softwarebasierte Planungsunterstützung</b>         | <b>103</b> |
| 9.1 Optimierungs-Applikation                            | 103        |
| 9.2 Recommender-Applikation                             | 106        |
| 9.3 Zusammenfassung                                     | 109        |
| <b>10 Generierung eines Technologiedatensatzes</b>      | <b>111</b> |
| 10.1 Produktionsszenarien                               | 113        |
| 10.1.1 Losgröße   | 115        |
| 10.1.2 Qualität   | 116        |
| 10.2 Technologiewahrscheinlichkeiten                    | 117        |
| 10.3 Heuristische Berücksichtigung von Interdependenzen | 119        |
| 10.4 Zusammenfassung                                    | 122        |
| <b>11 Evaluation der Planungsunterstützungs-Tools</b>   | <b>123</b> |
| 11.1 Aufbau und Ablauf der Studie                       | 123        |
| 11.2 Messung der Zielgrößen                             | 126        |
| 11.3 Auswertung der Studie                              | 127        |
| 11.4 Zusammenfassung                                    | 137        |
| <b>12 Technische Validierung des Ansatzes</b>           | <b>139</b> |
| 12.1 Beschreibung der Stichprobe aus der Industrie      | 140        |
| 12.2 Vergleich der Studienergebnisse mit der Evaluation | 140        |
| 12.3 Technischer Nutzen der Recommender-App             | 142        |

|   |            |
|---|------------|
| 12.4 Zusammenfassung  | 145        |
| <b>13 Technisch-wirtschaftliche Verwertung des Ansatzes</b> | <b>147</b> |
| 13.1 Struktur der Faserverbundindustrie                     | 147        |
| 13.2 Ableitung eines Nutzungsmodells                        | 149        |
| 13.2.1 Nutzungsmodell                                       | 149        |
| 13.2.2 Kommunikationsstrategie                              | 150        |
| 13.2.3 Bereitstellung                                       | 151        |
| 13.3 Monetarisierung von Prozessdaten                       | 152        |
| 13.4 Geschäftsmodellgestaltung                              | 154        |
| 13.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Verwertungsstrategie    | 161        |
| 13.5.1 Erste Verwertungsphase – Daten- und Nutzerakquise    | 162        |
| 13.5.2 Zweite Verwertungsphase – Digitales Ökosystem        | 164        |
| 13.6 Zusammenfassung  | 167        |
| <b>14 Zusammenfassung</b>                                   | <b>169</b> |
| <b>15 Ausblick</b>  | <b>173</b> |
| <b>16 Summary</b>   | <b>176</b> |
| <b>17 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>               | <b>180</b> |
| 17.1 Abbildungen  | 180        |
| 17.2 Tabellen   | 186        |
| <b>18 Literatur</b>   | <b>188</b> |
| <b>19 Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen</b>    | <b>224</b> |
| <b>20 Anhang B: Geometrieklassifizierung</b>                | <b>227</b> |
| <b>21 Anhang C: Kofferschalengerüst</b>                     | <b>232</b> |
| <b>22 Anhang D: Entscheidungsunterstützungsapps</b>         | <b>234</b> |
| <b>23 Anhang E: Generierung des Datensatzes</b>             | <b>238</b> |
| 23.1 Verteilungsfunktionen in Abhängigkeit der Losgröße     | 239        |
| 23.2 Verteilungsfunktionen in Abhängigkeit der Qualität     | 245        |

|  |     |
|--|-----|
| 23.3 Zusammenhang zwischen Konsolidierungsverfahren und<br>Nachbearbeitungsaufwand | 251 |
| 24 Anhang F: Design der Evaluationsstudie  | 253 |
| 24.1 Studienleitfaden – Einleitung   | 253 |
| 24.2 Studienleitfaden – Demographische Abfrage                                     | 254 |
| 24.3 Studienleitfaden – Szenario   | 255 |
| 24.4 Studienleitfaden – Aufgabenbearbeitung  | 255 |
| 24.4.1 Aufgaben EcoPreform   | 256 |
| 24.4.2 Aufgaben Recommender-App  | 260 |
| 24.4.3 Aufgaben Optimierungs-App   | 262 |
| 24.5 Studienleitfaden – Allgemeine Fragen  | 264 |
| 24.6 Studienleitfaden – System Usability Scale                                     | 265 |
| 24.7 Studienleitfaden – Ende   | 266 |
| 25 Anhang G: Studienergebnisse   | 267 |
| 26 Anhang H: Geschäftsmodellentwicklung  | 272 |