

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 Problemstellung..... | 2 |
| 1.2 Zielstellung..... | 6 |
| 1.3 Lösungsansatz | 8 |
| 1.4 Vorgehen und Aufbau der Arbeit..... | 9 |
| 2 STAND DER TECHNIK..... | 11 |
| 2.1 Justage, Genauigkeit und Kalibrierung | 11 |
| 2.2 Kalibrierstrategien zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern | 15 |
| 2.2.1 Level 1 Gelenkkalibrierung | 16 |
| 2.2.2 Level 2 Kinematische Kalibrierung..... | 17 |
| 2.2.3 Level 3 Nichtkinematische Kalibrierung..... | 20 |
| 2.2.4 Level 4 Zellenkalibrierung..... | 21 |
| 2.2.5 Zusammenfassung Kalibrierstrategien | 22 |
| 2.2.6 Regression und Regressionsmethoden..... | 22 |
| 2.2.7 Methode der kleinsten Quadrate | 24 |
| 2.2.8 Genauigkeitssteigerung mittels künstlicher neuronaler Netze..... | 26 |
| 2.3 Grundlagen künstlicher neuronaler Netze..... | 28 |
| 2.3.1 Maschinelles Lernen | 29 |
| 2.3.2 Entwicklung des künstlichen Neurons und neuronaler Netze | 31 |
| 2.3.3 Training künstlicher neuronaler Netze, am Beispiel einer 3D- Koordinatentransformation | 38 |
| 2.4 Hyperparameterstudien | 47 |
| 2.5 Zusammenfassung und spezifische Zielsetzung unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus dem Stand der Technik..... | 49 |
| 3 KONZEPTION UND FUNKTIONELLE UMSETZUNG EINES STAPELSYSTEMS FÜR PROTONEN-AUSTAUSCH-MEMBRAN- BRENNSTOFFZELLEN..... | 51 |

| | |
|--|----|
| 3.1 Beschreibung der Handhabungs- und Montageaufgabe | 51 |
| 3.1.1 Funktionsweise einer Protonen-Austausch-Membran-Brennstoffzelle | 51 |
| 3.1.2 Vorstellung der Brennstoffzellenbauteile MEA und BPP | 53 |
| 3.1.3 Anforderungen an den Handhabungs- und Stapelprozess | 54 |
| 3.2 Pick-and-Place-Anlagenkonzepte zum Stapeln von Brennstoffzellen | 59 |
| 3.2.1 Bekannte Arbeiten zum Stapeln von Brennstoffzellen | 59 |
| 3.2.2 2D-Layoutentwicklung zur Pick-and-Place-Stapelanlage | 61 |
| 3.2.3 Simulation der Pick-and-Place-Stapelanlagen | 68 |
| 3.3 Detaillierung ausgewählter und konzeptionierter Systemkomponenten | 73 |
| 3.3.1 Auswahl des Industrieroboters | 73 |
| 3.3.2 Konzeptionierte binäre Kippaktorik für geeigneten Ablageprozess | 77 |
| 3.3.3 Konzipiertes Greifsystem für formadaptive Handhabungsprozesse | 78 |
| 3.3.4 Magazine und Analyse der ausgelegten Magazinkameratechnik | 82 |
| 3.3.5 Konstruktion einer geeigneten, absenkbaren Stapelvorrichtung | 85 |
| 3.3.6 Messstation für die präzise Posevermessung | 86 |
| 3.3.7 Konzipierte Bildverarbeitung zur Ermittlung der Pose von MEA und BPP | 87 |

4 GENAUIGKEITSSTEIGERUNG VON GREIF- UND PLATZIERPROZESSEN MITTELS KÜNSTLICHER NEURONALER NETZE..... 90

| | |
|--|-----|
| 4.1 Versuchsabfolge | 90 |
| 4.2 Tauglichkeitsprüfung von KNN zur Verbesserung von Handhabungsvorgängen Versuchsreihe I | 93 |
| 4.2.1 Aufbau Versuchsreihe I | 93 |
| 4.2.2 Datensatzerzeugung Versuchsreihe I | 95 |
| 4.2.3 Training Versuchsreihe I | 96 |
| 4.2.4 Reale Validierung Versuchsreihe I | 99 |
| 4.3 Übertragung der KNN-Kalibriermethode auf die Handhabung von Brennstoffzellen Versuchsreihe II | 101 |
| 4.3.1 Aufbau Versuchsreihe II | 101 |
| 4.3.2 Datensatzerzeugung Versuchsreihe II | 104 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.3 Implementierte Hyperparameterstudie | 106 |
| 4.3.4 Hyperparameterstudie mit Datensatz b0 in Versuchsreihe II | 111 |
| 4.3.5 Reale Validierung Versuchsreihe II b0, KNN 1b0 | 114 |
| 4.3.6 Datensatzaufbereitung | 115 |
| 4.3.7 Referenzmodell Versuch II b1 | 117 |
| 4.3.1 Reduktion der Trainingsdaten Versuch II b2 | 120 |
| 4.3.1 Input-Parameter Scale Versuch II b3 | 121 |
| 4.3.1 Änderung der Aktivierungsfunktion Versuch II b4 | 124 |
| 4.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse Versuch II b1-b4 | 126 |
| 4.3.1 Kumulativer Versuch II c | 127 |
| 4.3.2 Zusammenfassung Versuchsreihe II | 135 |
| 4.4 Einlagiges Ablegen mit Biegegreifer Versuchsreihe III | 136 |
| 4.4.1 Genauigkeit des Montagesystems ohne KNN-Kalibrierung | 136 |
| 4.4.2 Wiederholgenauigkeit des Montageroboters mit ebener Greiffläche | 137 |
| 4.4.3 Wiederholgenauigkeit des Roboters mit gebogener Greiffläche | 140 |
| 4.4.4 Optimierter Versuchsstand Versuchsreihe III | 141 |
| 4.4.5 Erstellung Datensatz d | 142 |
| 4.4.6 KNN-Hyperparameterstudie mit Datensatz d | 145 |
| 4.4.7 Realer Test des KNN mit biegbarem Leichtbaugreifer | 145 |
| 4.4.8 Erkenntnisse aus Versuchsreihe III | 146 |
| 5 VERGLEICHENDE MULTI-METHODEN-REGRESSIONSSTUDIE MIT HYPERPARAMETEROPTIMIERUNG | 149 |
| 5.1 Ablauf des Regressionsvergleichs | 152 |
| 5.2 Regressionsergebnisse über fünf Datensätze | 156 |
| 5.2.1 Ergebnisse mit Datensatz PoC 2017 aus Versuchsreihe I zum ebenen Greifen und ebenen Ablegen | 156 |
| 5.2.2 Ergebnisse mit Datensatz BZ I 2018 aus Versuchsreihe II zum Greifen aus einem Magazin und ebenen Ablegen | 159 |
| 5.2.3 Ergebnisse mit Datensatz BZ II 2019 aus Versuchsreihe III zum Greifen aus einem Magazin und Ablegen mit Biegefunktion | 160 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.4 Ergebnisse mit Datensatz BZ III 2020 zum Greifen aus einem Magazin und Ablegen mit Biegefunktion auf eine geneigte Ebene | 163 |
| 5.2.5 Ergebnisse mit dem extern ermittelten Datensatz EIA 2021 | 164 |
| 5.3 Übergeordnete Auswertung der Regressionsergebnisse..... | 166 |
| 6 ERPROBUNG DES KALIBRIERKONZEPTE MIT KÜNSTLICHEN NEURONALEN NETZEN AM STAPELPROZESS VON BRENNSTOFFZELLEN | 169 |
| 6.1 Identifikation und Planung | 171 |
| 6.2 Aufbau und funktionelles Einrichten..... | 176 |
| 6.3 Systembeobachtung und Datensatzerzeugung..... | 176 |
| 6.4 Modellbildung | 182 |
| 6.4.1 Input-Output-Strategie | 182 |
| 6.4.2 Mehrstufige Hyperparameterstudie..... | 183 |
| 6.4.3 Vergleich der Modelle aus Hyperparameterstudien..... | 184 |
| 6.5 Reale Stapeltests mit KNN-Kalibrierung | 186 |
| 6.5.1 Überprüfung der Handhabungsgenauigkeit mit KNN..... | 186 |
| 6.5.2 Stapelversuch mit stapellagenspezifisch trainierten KNN | 187 |
| 6.5.3 Finaler realer Stapelversuch ohne Lagenzahl..... | 191 |
| 6.6 Produktivbetrieb | 197 |
| 6.7 Verwertung und Ausblick Pick-and-Place-Brennstoffzellenmontage..... | 199 |
| 6.7.1 Weiterführende Versuche zum genauen Greifen bewegter Objekte mittels künstlicher neuronaler Netze | 201 |
| 6.7.2 Weiterführende Versuche zur Kalibrierung mittels gefalteter neuronaler Netze. | 203 |
| 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 205 |
| 8 LITERATUR | 209 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 223 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 230 |