

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 geneigten 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 geneigten, absenkbarsten 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 Genaugigkeit 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 KALIBRIERKONZEPTES 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