

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xvii
Abbildungsverzeichnis	xxi
Tabellenverzeichnis	xxv
1 Einleitung	1
1.1 Problemeinschränkung und Forschungshypothese	2
1.2 Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Aufbau und Datenmodelle eines Leitungssatzes	5
2.2 Mathematische Notationen	7
2.3 Graphen-basierte Leitungssatzmodellierung	8
2.4 Roboterbasierte Handhabung aus Bilddaten	8
2.4.1 Roboterkinematik	9
2.4.2 Extrinsische Kalibrierung	11
2.5 Machine Learning für die Bildverarbeitung	12
2.5.1 Training von Deep-Learning-Netzwerken	15
2.5.2 Augmentierung in der Bildverarbeitung	17
2.5.3 Transfer Learning	18

ix

Inhaltsverzeichnis

3 Stand der Forschung und Technik	19
3.1 Roboterbasierte Handhabung von DLO	20
3.1.1 Erkennung von DLO	20
3.1.2 Manipulation von DLO	23
3.1.3 Mehrstufige Handhabungsprozesse	24
3.2 Roboterbasierte Handhabung von verzweigten DLO	25
3.2.1 Erkennung von verzweigten DLO	25
3.2.2 Mehrstufige Handhabungsprozesse	27
3.3 Zusammenfassung und Defizite	28
4 Zielsetzung	33
4.1 Aufbau der Arbeit	34
5 Topologieschätzung bei Leitungssätzen	37
5.1 Allgemeine Methodik zur Topologieschätzung	37
5.2 Indirekte Topologieschätzung	40
5.2.1 Eigenschaften der Indirekten Topologieschätzung	40
5.2.2 Zusammenhang zwischen indirekter und direkter Topologie- schätzung	41
5.3 Direkte Topologieschätzung	42
5.3.1 Eigenschaften der Direkten Topologieschätzung	42
5.3.2 Partielle direkte Topologieschätzung	43
5.4 Analytische und registrierungsbasierte Ansätze zur Topologie- schätzung mit Ausblick auf Deep-Learning-Methoden	44
5.4.1 Analytische indirekte Topologieschätzung	44
5.4.2 Direkte Topologieschätzung über Registrierungsmethoden .	46
5.4.3 Fazit zur Nutzung von analytischen und registrierungs- basierten Lösungen	47
6 Modellentwicklung und Softwarearchitektur	49
6.1 Vorversuch zur Erkennung topologisch relevanter Merkmale an Leitungssätzen	49
6.1.1 Ziel und Versuchsbeschreibung	50
6.1.2 Ergebnisse	50

6.2	Modellierung und Annotierung von Leitungssätzen für die kamerabasierte Topologieschätzung	52
6.3	Evaluierungsmetriken für die splinebasierte Topologieschätzung	53
6.4	Datenverarbeitung und Deep-Learning-Modelle	60
6.4.1	Softwarearchitektur	60
6.4.2	Generierung von synthetischen Daten	63
6.4.3	Entwicklung des SHS-Modells und Verifizierung der Modellierung	66
6.4.4	Modellvergleich und Trainingsarchitektur	73
7	Validierung der direkten und indirekten Topologieschätzung	79
7.1	Direkte und indirekte Topologieschätzung an einem 3-Segment-Leitungssatz	80
7.1.1	Ziel und Versuchsbeschreibung	80
7.1.2	Ergebnisse	81
7.2	Direkte und indirekte Topologieschätzung an einem 11-Segment-Leitungssatz	87
7.2.1	Ziel und Versuchsbeschreibung	87
7.2.2	Ergebnisse	88
7.2.3	Robustheitsuntersuchung der direkten Modelle	93
7.3	Direkte und indirekte Topologieschätzung durch Vortraining an einem 11-Segment-Leitungssatz	95
7.3.1	Ziel und Versuchsbeschreibung	96
7.3.2	Generierung der synthetischen Daten und Ergebnisse	97
7.3.3	Ergebnisse des Transferlernens mit synthetischen und realen Daten	100
7.3.4	Fazit zum Vortraining zur Steigerung der Precision bei kleinen Datensätzen	103
8	Experimente zur roboterbasierten Handhabung von Leitungssätzen	105
8.1	Automatisierte Kistenentnahme durch partielle direkte Topologieschätzung für die automatisierte Steckermontage	105
8.1.1	Ziel und Versuchsbeschreibung	106
8.1.2	Methodikbeschreibung und Ergebnisse	108

Inhaltsverzeichnis

8.2 Automatisierte Kistenentnahme durch partielle direkte Topologieschätzung zur Leitungssatzverlegung	114
8.2.1 Ziel und Versuchsbeschreibung der Kistenentnahme mit mitbewegter Kamera	116
8.2.2 Ergebnisse der Kistenentnahme mit mitbewegter Kamera . .	117
8.2.3 Ziel und Versuchsbeschreibung der Leitungssatzverlegung mit statischer Kamera	119
8.2.4 Ergebnisse der Leitungssatzverlegung mit statischer Kamera	120
8.3 Fazit und Beitrag dieser Arbeit	124
8.3.1 Theoretischer Beitrag zur Erkennung von Leitungssätzen für die roboterbasierte Handhabung	128
8.3.2 Praktischer Beitrag zur Erkennung von Leitungssätzen für die roboterbasierte Handhabung	130
8.3.3 Diskussion und Limitierungen	131
9 Zusammenfassung und Ausblick	133
Literatur mit Erstautorenschaft	137
Literatur	139