

## **Inhaltsverzeichnis**

Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Formelverzeichnis .....	XVII
Abkürzungsverzeichnis .....	XIX
Symbolverzeichnis .....	XXIII
1 Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung und Motivation .....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	5
2 Grundlagen von Predictive Quality .....	9
2.1 Grundzüge des Qualitätsmanagements .....	9
2.1.1 Definition des Qualitäts- und Fehlerbegriffs .....	9
2.1.2 Aufbau von Qualitätsmanagementsystemen und relevante Vorschriften .....	14
2.1.3 Methoden und Werkzeuge des Qualitätsmanagements.....	19
2.1.3.1 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse .....	19
2.1.3.2 Fehler-Prozess-Matrix.....	24
2.1.3.3 Poka-Yoke .....	26
2.1.4 Qualitätsbezogene Kosten .....	27
2.2 Grundlagen und Algorithmen aus dem Bereich „maschinelles Lernen“ .....	32
2.2.1 Einordnung und Arten des maschinellen Lernens.....	32
2.2.2 Prozesse zur Bearbeitung von Data-Mining-Projekten.....	35
2.2.3 Verfahren zur Datenvorbereitung und Ergebnisvalidierung.....	42
2.2.3.1 Umgang mit unausgeglichenen Datensets.....	42
2.2.3.2 Dimensionsreduzierung .....	45
2.2.3.3 Bewertung von Klassifikatoren.....	48
2.2.4 Ausgewählte Algorithmen aus dem Maschinellen Lernen.....	52
2.2.4.1 Hierarchisches Clustering .....	52
2.2.4.2 Partitionierendes Clustering mit dem k-Means- Algorithmus .....	56
2.2.4.3 (k)-Nächste-Nachbarn-Algorithmus.....	58
2.2.4.4 Entscheidungsbäume.....	61
2.2.4.5 Model Ensembles und Random Forest.....	64
2.3 Predictive Quality zu Zeiten der vierten industriellen Revolution.....	70
2.3.1 Die vierte industrielle Revolution und ausgewählte Technologiefelder.....	70

2.3.2	Predictive Maintenance und Predictive Quality.....	73
2.3.3	Literaturanalyse zu Anwendungsfällen von Predictive Quality.....	76
2.3.3.1	Konzeption der Analyse.....	76
2.3.3.2	Ergebnisse der Literaturanalyse.....	79
3	Methodische Umsetzung von Predictive Quality in der Automobilmontage .....	85
3.1	Eingangskenngrößen zur virtuellen Nachbildung fehlerverursachender Montagesituationen .....	85
3.1.1	Produktbezogene Eingangsgrößen .....	85
3.1.1.1	Baureihe und Derivat.....	86
3.1.1.2	Sonderausstattungen und Länderausführungen.....	88
3.1.1.3	Motor- und Antriebsvarianten .....	91
3.1.2	Prozessbezogene Kenngrößen .....	93
3.1.2.1	Auslastung und beidseitiges Abdriften.....	96
3.1.2.2	Prozessvarianten und Variantenanteil.....	101
3.1.2.3	Montagewirkungsgrad .....	109
3.1.3	Menschliche Eingangsgrößen .....	116
3.1.3.1	Wochentag und (verstrichene) Schichtdauer.....	119
3.1.3.2	Belastungen an einer Montagestation .....	121
3.1.3.3	Rotationsdauer .....	126
3.1.3.4	Übungsgrad an einer Montagestation.....	127
3.2	Auswahl von Fehlerbildern als Klassenlabels.....	128
3.2.1	Potenzielle Fehlerbilder der Automobilmontage .....	128
3.2.2	Anforderungen an die Fehlerbilder .....	133
3.2.2.1	Diskussion: Verschraubungsfehler .....	135
3.2.2.2	Diskussion: Spaltbild- und Passungsfehler.....	141
3.3	Fehlerprognose mittels überwachten Klassifikationsalgorithmen .....	147
3.3.1	Fehlervorhersage durch Klassifikationsalgorithmen .....	147
3.3.2	Priorisierung potenzieller Fehlerbilder mittels Risikoanalyse.....	152
3.4	Potenzielle Anwendungsszenarien zur Qualitäts- und Effizienzsteigerung .....	155
3.4.1	Werkерinformation zur Fehlerfrühwarnung .....	155
3.4.2	Werkерassistenz durch situative Unterstützung.....	157
3.4.3	Fahrzeugprüfung mit dynamischen Prüfumfängen.....	159
4	Umsetzung von Predictive Quality am Beispiel der BMW Group.....	163
4.1	Montage- und Prüfprozesse bei der BMW Group.....	163
4.1.1	Darlegung des Betrachtungsgegenstandes.....	163

4.1.2	Qualitäts- und dynamische Abschnittsprüfung .....	168
4.2	Erstellung des Datensets zur Potenzialanalyse .....	173
4.2.1	Auswahl von Merkmalen zur Beschreibung der Montagesituation.....	173
4.2.2	Auswahl von prognoserelevanten Fehlerbildern .....	177
4.2.3	Clustering von Montagetakten.....	179
4.3	Fehlerprognose mittels eines Klassifikators .....	186
4.3.1	Klassifikationsalgorithmus und Hyperparametertuning .....	186
4.3.2	Erweiterung der Fehlerprognose um ein Ergebnisvoting .....	188
4.3.3	Modifikation der Fehlerprognose am Beispiel der BMW Group....	191
4.4	Bewertung des Potenzials zur Qualitäts- und Effizienzsteigerung .....	193
4.4.1	Vorgehensweise und Zielsetzung der Potenzialanalyse .....	193
4.4.2	Wahl eines praxistauglichen Anwendungsfalls zur Fehlervermeidung/-entdeckung.....	194
4.4.3	Potenzialanalyse für den Testzeitraum .....	199
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	205
5.1	Kurzfassung und zentrale Ergebnisse der Arbeit .....	205
5.2	Limitation der Ergebnisse .....	206
5.3	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....	208
	Literaturverzeichnis .....	211
	Anhangsverzeichnis .....	231
Anhang 1:	Hopkins-Werte zur Untersuchung der Clustertendenz.....	233
Anhang 2:	Verteilung der beiden Klassen je Stationscluster.....	234
Anhang 3:	Clusterzugehörigkeit für analyserelevante Montagestationen ...	280
Anhang 4:	Votingergebnisse – Hardvoting.....	281
Anhang 5:	Votingergebnisse – Hardvoting 2.....	282
Anhang 6:	Votingergebnisse – Softvoting .....	284
Anhang 7:	Votingergebnisse – Softvoting 2 .....	285