

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Identifizierte industrielle Problemstellung und Anforderungen.....	4
1.1.1	Bedarf für 3D-Modelle und technische Unterlagen .....	5
1.1.2	Anwendungsfälle und Bedarfe industrieller Instandhaltungsprozesse.....	7
1.2	Zielstellung der Forschungsarbeit.....	8
1.3	Abgrenzung .....	9
1.4	Forschungsfragen und –hypothesen.....	10
1.5	Methodisches Vorgehen .....	11
2	Stand der Technik und Wissenschaft .....	13
2.1	Grundlagen der Instandhaltung .....	13
2.2	Instandhaltungsstrategien.....	17
2.3	Instandhaltung im Produktlebenszyklus .....	19
2.4	Informationstechnische Systeme in der Instandhaltung .....	23
2.5	3D-Scanning und Reverse Engineering in der Instandhaltung .....	25
2.5.1	3D-Messverfahren.....	26
2.5.2	Anwendungsfelder in industriellen Prozessen.....	35
2.5.3	Industrielle Anforderungen an die Technologieauswahl .....	37
2.5.4	Postprocessing von 3D-Scandaten.....	41
2.6	Computer Vision .....	47
2.6.1	Grundlagen der Objekterkennung.....	47
2.6.2	Bauteildatenbanken und Geometriesuche .....	51
2.6.3	Segmentierungsverfahren .....	52
2.6.4	Objekterkennung in industriellen RE-Prozessen .....	57
2.7	Fazit .....	59
3	Identifikation der konkreten Verbesserungspotentiale .....	61
3.1	Analyse von industriellen Instandhaltungsprozessen .....	61
3.1.1	Bewertung der Gesamtsituation.....	62
3.1.2	Erkenntnisse aus der Studie.....	63
3.1.3	Repräsentativität der Studie für den Stand der Technik und Bedarf.....	65
3.2	Referenzprozess und Verbesserungspotentiale.....	66
3.3	Innovative Maßnahmen zur Unterstützung des Instandhaltungsprozesses.....	70
3.4	Fazit .....	73

4	Lösungskonzept und Analyse von Umsetzungsmöglichkeiten .....	75
4.1	3D-Scan und Digitalisierung .....	76
4.2	Segmentierung von Einzelteilgeometrien .....	78
4.2.1	Segmentierung mit der kommerziellen Software Geomagic® Studio .....	81
4.2.2	Segmentierungsverfahren von Lavoué et al. ....	82
4.2.3	Euclidean Cluster Extraction.....	89
4.2.4	Segmentierung von CT-Daten mit AVIZIO® Standard .....	90
4.3	Einzelteilidentifikation durch Geometriesuche in einer Datenbank .....	92
4.3.1	Identifikation mit der kommerziellen Software CADENAS PARTsolutions .....	94
4.3.2	Eigenentwicklung auf Grundlage von Open Source Bibliotheken.....	96
4.4	Abweichungsanalyse und Toleranzbestimmung .....	106
4.5	Aufbau von Baugruppenmodellen.....	109
4.5.1	Konzept der Bildregistrierung .....	110
4.5.2	Merkmalsextraktion .....	111
4.5.3	Merkmalsanpassung .....	112
4.5.4	Verwerfung .....	113
4.5.5	Ausrichtung .....	114
4.6	Erstellung der Produktstruktur für den PDM-Export .....	114
4.7	Auswahl eines Frameworks .....	115
4.8	Fazit .....	118
5	Experimentelle Voruntersuchungen der Teillösungen.....	119
5.1	3D-Digitalisierung .....	120
5.1.1	Der Scanprozess mit TRITOP .....	122
5.1.2	Der Scanprozess mit dem ATOS III Triple Scan .....	125
5.1.3	Aufbau eines Baugruppenmodells mit Standardsoftware.....	129
5.1.4	Ergebnisse .....	130
5.1.5	Versuchsobjekt für die nachfolgenden Testreihen .....	134
5.2	Bauteilsegmentierung.....	135
5.2.1	Kurvenextraktion mit Geomagic® Studio .....	135
5.2.2	Segmentierungsverfahren von Lavoué et al. ....	137
5.2.3	Euclidean Cluster Extraction.....	146
5.2.4	Segmentierung von CT-Daten mit AVIZO® Standard .....	148
5.2.5	Zusammenfassende Beurteilung der Segmentierungsverfahren.....	152
5.3	Identifikation .....	153
5.3.1	Identifikation von segmentierten CT-Daten mit CADENAS PARTsolutions.....	154

5.3.2	Identifikation von segmentierten 3D-Scandaten durch Kombination von globalen Deskriptoren.....	156
5.3.3	Identifikation von segmentierten 3D-Scandaten mit dem SHOT-Deskriptor.....	162
5.3.4	Zusammenfassende Beurteilung der Identifikationsverfahren.....	173
5.4	Aufbau von Baugruppenmodellen.....	174
5.4.1	Semi-automatische Baugruppenrekonstruktion .....	174
5.4.2	Zusammenfassende Beurteilung des Baugruppenaufbaus.....	179
5.5	Verfahrensauswahl für den Gesamtprozess .....	179
6	Softwareintegration und Verfahrensvalidierung .....	183
6.1	Integration der Lösungselemente im RE Cockpit .....	185
6.2	3D-Digitalisierung .....	191
6.2.1	Digitalisierungsstrategie für die Verdichtereinheit .....	192
6.2.2	Digitalisierungsstrategie für die Turbinenstufe .....	196
6.2.3	Nachbearbeitung des Polygonmodells in Geomagic® .....	198
6.2.4	Beurteilung des Ergebnisses .....	199
6.3	Versuchsaufbau nach Design of Experiments (DoE) .....	201
6.3.1	Datensammlungsplan.....	203
6.3.2	Testdaten für die Versuchsreihen .....	205
6.4	Schaufelsegmentierung .....	211
6.4.1	Verdichtereinheit und Euclidean Cluster Extraction .....	211
6.4.2	Verdichtereinheit und Geomagic® Studio .....	217
6.4.3	Turbinenstufe und Euclidean Cluster Extraction .....	221
6.4.4	Turbinenstufe und Geomagic® Studio .....	223
6.4.5	Gesamtfazit zu den Ergebnissen der Schaufelsegmentierung .....	225
6.5	Schaufelidentifikation.....	225
6.5.1	Vergleich von lokalen Merkmalen .....	225
6.5.2	Vergleich von globalen Merkmalen.....	240
6.5.3	Gesamtfazit zu den Ergebnissen der Schaufelidentifikation.....	249
6.6	Schaufelbefundung.....	250
6.6.1	Abweichungsanalyse der ersten Turbinenstufe .....	250
6.6.2	Gesamtfazit zu den Ergebnissen der Schaufelbefundung .....	259
6.7	Baugruppenaufbau .....	260
6.7.1	Rekonstruktion der Turbinenstufe.....	260
6.7.2	Gesamtfazit zu den Ergebnissen des Baugruppenaufbaus.....	263

7	Schlusswort.....	265
7.1	Zusammenfassung und Fazit.....	265
7.2	Wissenschaftliche Weiterentwicklungsmöglichkeiten .....	268
7.3	Zukünftige Anwendungsfelder .....	272
7.3.1	Identifikation von Änderungen .....	272
7.3.2	Computer Vision für Robotersteuerung.....	273
7.3.3	Rekonstruktion von Schalt- und Layoutplänen.....	273
7.4	Zukunftsvision für Inspektions- und Reengineeringprozesse .....	274
	Literaturverzeichnis .....	275
	Glossar.....	293
	Anhang.....	301
	Anhang A1: Daten, Informationen und Wissen in der Instandhaltung.....	302
	Anhang A2: Fragebögen für die Unternehmensstudien.....	312
	Anhang A3: Erläuterungen zu den implementierten Verfahren.....	329
	Anhang A4: Datenformate.....	337