
Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Quellcodeverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xxi
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Predictive Analytics für additive Fertigungstechnologien	5
1.2 Data Mining nach CRISP-DM	14
1.3 Aufbau der Arbeit	15
2 Additive Fertigung und PBF-Systemaufbau	17
2.1 Prinzip und Verfahrensübersicht	18
2.1.1 Lasersintern (SLS)	21
2.1.2 Powder Bed Fusion (PBF)	22
2.1.3 Laserauftragsschweißen (DMD)	25
2.1.4 Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	25
2.1.5 Material Extrusionsverfahren (FFF)	26
2.1.6 Material Verdüsung (3DP)	26
2.1.7 Lichtbogen-Drahtschweißen (WAAM)	26
2.1.8 Multi-Jet Modelling (MJM)	27
2.1.9 Stereolithografie (SL)	27
2.1.10 Poly-Jet Modelling (PJM)	28
2.1.11 Digital Light Processing (DLP)	28
2.1.12 Aerosolverfahren (AJ)	28
2.1.13 Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD)	29
2.2 PBF-System Aufbau und Funktionsweise	29
2.2.1 Prozesskammer	31

2.2.2	Optikeinheit.....	31
2.2.3	Schutzgassystem.....	32
2.2.4	Prozessrelevante- und komponentenbezogene Sensordaten	33
2.2.5	Einflussfaktoren auf den PBF-Prozess.....	34
3	Betriebswirtschaftliche Zielsetzung	37
3.1	Ungeplante Ausfälle von PBF-Systemen.....	38
3.1.1	Auswirkungen von Störungen.....	38
3.1.2	Relevanz von Produktionsunterbrechungen.....	40
3.2	Betriebswirtschaftliche Bewertung von ungeplanten Ausfällen	43
3.2.1	Fertigungskosten von PBF-Systemen	43
3.2.2	Kostenmodell für den ungeplanten Produktionsausfall	45
3.3	Betriebswirtschaftliche Ziele.....	52
3.4	Data-Mining-Ziele.....	55
4	Datengrundlage	57
4.1	Datenbeschreibung und -struktur	59
4.1.1	Sensorprotokolldatei.....	59
4.1.2	Ereignisprotokolldatei	63
4.1.3	Konfigurationsprotokolldatei	65
4.2	Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Rohdaten.....	65
4.2.1	Abhängigkeiten mit der Zielvariable.....	66
4.2.2	Zusammenhänge einzelner Sensorwerte	68
4.3	Verifikation Datenqualität.....	71
5	Datenvorbereitung.....	75
5.1	Rohdatenvorbereitung	75
5.2	Datenaggregation	76
5.2.1	Extrema, Mittelwert, Median und Standardabweichung.....	80
5.2.2	Differenz und Vergleichswerte	83
5.2.3	Wendepunkte.....	84
5.2.4	Wölbung und Schiefe	84
5.2.5	Interquartilsabstand	85
5.2.6	Korrelationskoeffizienten.....	86
5.2.7	Schichtbezogene und allgemeine Aggregation	87
5.3	Attributsselektion	89

6	Modellerstellung	95
6.1	Einordnung Lernverfahren.....	96
6.2	Modellbildung und Parameterauswahl	98
6.2.1	Rapidminer als Werkzeug.....	99
6.2.2	Trainings- und Testdaten	99
6.2.3	Generalisierte Lineare Modelle	101
6.2.4	Logistische Regression	102
6.2.5	Entscheidungsbaum	103
6.2.6	Random Forest.....	106
6.2.7	Gradient Boosted Trees	109
6.2.8	Neuronale Netze	112
6.2.9	Support Vector Machine.....	115
6.3	Bewertung und Modellvorauswahl.....	117
6.3.1	Prognosegenauigkeit und Konfusionsmatrix	118
6.3.2	Grenzwertoptimierungskurve (ROC, AUC).....	119
6.3.3	Kreuzvalidierung	122
6.3.4	Performance Vergleich der Modelle.....	123
6.4	Modelloptimierung	125
6.4.1	XGBoost	126
6.4.2	Optimierung Hyperparameter	129
6.4.3	Attributsauswahl	136
6.5	Ergebnisse in Abhängigkeit zum Vorhersagezeitpunkt.....	139
7	Modellevaluation	143
7.1	Interpretation der Prognosegüte zum Vorhersagezeitpunkt	143
7.2	Blackbox Interpretation der Modellergebnisse.....	145
7.2.1	SHAP	147
7.2.2	Umsetzung in Python.....	155
7.2.3	Interpretation von SHAP-Plots.....	156
7.3	Betriebswirtschaftliche Evaluation	164
7.4	Diskussion und Implikationen	171
7.4.1	Praktische Anwendung	172
7.4.2	Strategische Implikation	173
7.4.3	Additive Wertschöpfungskette	175
8	Fazit und Ausblick.....	185

9 Literaturverzeichnis.....189

Anhang215

A.1 CRISP-DM215

A.2 Einflussfaktoren und Ablauf additive Fertigung219

A.3 Attribute und statistische Kennzahlen.....220

A.4 Rapidminer226

A.5 Python, XGBoost, Code228

A.6 SHAP.....231

A.7 Betriebswirtschaftliche Aspekte.....233

Curriculum Vitae.....237