

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>2</b>
2.1	Grundlagen der Prozesstechnik Kleben .....	2
2.1.1	Grundlagen der Klebtechnik .....	2
2.1.2	Charakteristika von Polyurethanklebstoffen .....	3
2.1.3	Automatisierte Klebstoffverarbeitung .....	3
2.1.3.1	Prozesszeiten .....	4
2.1.3.2	Klebstoffverarbeitungsanlagen .....	5
2.1.3.3	Methoden zum Fügen und Fixieren .....	6
2.1.4	Bekannte Einflüsse und Wechselwirkungen auf eine Klebverbindung .....	6
2.2	Methoden zur Qualitätssicherung in der Klebtechnik .....	7
2.2.1	Prozessintegrierte Qualitätssicherungsmaßnahmen .....	7
2.2.2	Prozessnachgelagerte Qualitätssicherungsmaßnahmen .....	8
2.2.2.1	Versagensursachen und Versagensarten von Klebverbindungen .....	8
2.2.2.2	Zerstörende Qualitätssicherung von Klebverbindungen .....	9
2.2.2.3	Zerstörungsfreie Qualitätssicherung von Klebverbindungen .....	9
2.3	Methoden zur Instandhaltung automatisierter Klebanlagen .....	10
2.3.1	Einteilung der unterschiedlichen Instandhaltungsmaßnahmen .....	10
2.3.2	Prädiktive Instandhaltung automatisierter Anlagen .....	11
2.3.3	Angewandte Instandhaltungsmaßnahmen in der Klebtechnik .....	11
2.4	Grundlagen der Datenanalyse .....	11
2.4.1	Einteilung der prädiktiven und deskriptiven Analyseverfahren .....	12
2.4.2	Vorgehensmodell zur Analyse von Daten .....	13
2.4.3	Grundprinzipien der in dieser Arbeit verwendeter Algorithmen .....	14
2.4.3.1	Entscheidungsbäume .....	14
2.4.3.2	Random Forests .....	15
2.4.3.3	Support Vector Machines .....	16
2.4.3.4	Multivariate Regression .....	17
2.4.3.5	Gaußprozesse .....	18
2.4.4	Qualitätsbeurteilung der Analysemodelle .....	19
2.5	Anwendung von automatischen Datenanalysen in produktionsnahen Bereichen .....	20
2.6	Beschreibung des Forschungsbedarfs .....	22
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>Beschreibung des betrachteten automatischen Klebstoffauftragsprozesses</b> .....	<b>26</b>
4.1	Konstruktive und prozessuale Anforderungen .....	26
4.2	Beschreibung der Klebstoffverarbeitung und der Klebstoffapplikation .....	27
4.3	Prüfung und Qualitätssicherung der Klebverbindung in der Serie .....	29
4.4	Instandhaltung der Anlagentechnik des betrachteten Klebprozesses .....	30
<b>5</b>	<b>Theoretische Systemanalyse als Vorbereitung zur Klebprozessmodellierung</b> .....	<b>31</b>
5.1	Analyse des betrachteten Klebprozesses .....	31
5.2	Untersuchung der im Serienprozess gemessenen Daten .....	34
5.3	Soll-Ist-Vergleich der aktuellen Prozessdatenaufzeichnung .....	35

<b>6</b>	<b>Klebtechnische Versuchsdurchführung zur Erstellung des Modelldatensatzes</b>	<b>36</b>
6.1	Experimentelle Planung	36
6.1.1	Bestimmung der Systemgrenzen des Untersuchungsbereichs	36
6.1.2	Auswahl der betrachteten Parameter und deren Untersuchungsgrenzen	37
6.1.3	Anpassung der Anlagentechnik im Versuchsumfeld und in der Serie	38
6.1.4	Besonderheiten und Herausforderungen bei der Klebstoffapplikation	39
6.1.5	Betrachtete Zielgröße, Prüfkörperaufbau und Prüfvorrichtung	40
6.1.6	Verwendete Kleb- und Fügeitwerkstoffe	41
6.1.6.1	Klebstoff	41
6.1.6.2	Fügeitwerkstoffe	42
6.1.7	Gestaltung des Versuchsplans	43
6.2	Experimentelle Durchführung	44
<b>7</b>	<b>Entwicklung des generischen Optimierungsalgorithmus zur Modellerstellung</b>	<b>46</b>
7.1	Datenvorverarbeitung zur Erstellung des Analysemodells	46
7.2	Zur Optimierung genutzte Modellkenngrößen der verwendeten Algorithmen	48
7.2.1	Entscheidungsbäume	48
7.2.2	Random Forests	48
7.2.3	Support Vector Machines	49
7.2.4	Multivariate Regression	49
7.2.5	Gaußprozesse	49
7.3	Basisalgorithmus zur Modellerstellung und -optimierung	49
<b>8</b>	<b>Modellierung des Klebprozesses mittels Datenanalysemethoden</b>	<b>52</b>
8.1	Modellierung des Klebprozesses mit Klassifikationsmodellen	52
8.1.1	Auswahl der relevanten zu optimierenden Gütekriterien	52
8.1.2	Entscheidungsbäume	53
8.1.3	Random Forests	56
8.1.4	Polynomiale Support Vector Machines	58
8.1.5	Radiale Support Vector Machines	61
8.2	Modellierung des Klebprozesses mit Regressionsmodellen	64
8.2.1	Abwandlung des Optimierungsalgorithmus für Regressionsmodelle	64
8.2.2	Multivariate Regression	64
8.2.3	Gaußprozesse	65
<b>9</b>	<b>Prozessdatenbasierte Prognose der Klebqualität</b>	<b>67</b>
9.1	Verwendung des entwickelten Analysemodells zur Qualitätsprognose	67
9.2	Entscheidungsbäume	68
9.3	Random Forests	72
9.4	Polynomiale und radiale Support Vector Machines	73
9.5	Regressive Methoden	74
9.6	Prozessdatenbasierte Prognoseoptimierung mittels Nachtraining	75
<b>10</b>	<b>Prozessdatenbasierte Verbesserung des Klebprozesses</b>	<b>77</b>
10.1	Effekte und Wechselwirkungen zwischen den betrachteten Einflussparametern	77
10.1.1	Effekte im Klebprozess	77
10.1.2	Wechselwirkungen im Klebprozess	78
10.2	Beschleunigte Fehlerursachenfindung	79

10.3	Prozessparameteranpassung zur Qualitätsverbesserung.....	81
<b>11</b>	<b>Prozessdatenbasierte prädiktive Instandhaltung von Klebanlagen .....</b>	<b>83</b>
11.1	Vergleich der Datensätze einer intakten sowie einer wartungsbedürftigen Anlage.....	83
11.2	Vergleich der entwickelten Prozessmodelle für die prädiktive Instandhaltung .....	85
<b>12</b>	<b>Verifikation der entwickelten Methoden zur Prozessunterstützung in der Serie. 88</b>	<b>88</b>
12.1	Verifikation der entwickelten Methoden an Serienprozessdaten .....	88
12.2	Bewertungskriterien zur Auswahl des optimalen Analysemodells.....	91
12.3	Vergleich der Prognosemodelle anhand der entwickelten Bewertungskriterien ....	93
12.4	Umsetzung eines ganzheitlichen Datenanalysesystems zur Prozessunterstützung für Klebanwendungen .....	94
12.5	Übertragbarkeit des Datenanalysesystems auf andere Klebanwendungen .....	96
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>100</b>
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>15</b>	<b>Verwendete Normen und Richtlinien.....</b>	<b>111</b>