

	Seite
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XIX
Verzeichnis der Abkürzungen	XXI
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Beiträge der Arbeit	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 Problembetrachtung und Anforderungsanalyse	7
2.1 Wesentliche Definitionen und Begriffe	7
2.2 Anwendungsszenarien und Randbedingungen	9
2.2.1 Allgemeine Anwendungsbereiche für Industrieroboter	10
2.2.2 Roboteranwendungen für Kleinserien und bei KMU	10
2.2.3 Nutzergruppen und Nutzerqualifikationen	13
2.2.4 Produktionsumgebung und Integration	14
2.2.5 Fazit zu Anwendungsszenarien und Randbedingungen	14
2.3 Generelle Anforderungen an den Robotereinsatz für Kleinserien	14
2.4 Ableiten der Anforderungen an das Programmier- und Bedienkonzept	17
2.4.1 Bedienerfreundlichkeit und Bedienbarkeit durch vorhandenes Personal	17
2.4.2 Wandlungsfähigkeit	19
2.4.3 Zuverlässigkeit und Prozesssicherheit	19
2.4.4 Rentabilität	20
2.4.5 Bediener-sicherheit	21
2.5 Zusammenfassung der Anwendungsszenarien und Anforderungen	21
3 Analyse zu geeigneten Methoden aus dem Stand der Technik und Forschung	25
3.1 Methoden der Industrieroboterprogrammierung	25
3.1.1 Einteilung der Verfahren zur Industrieroboterprogrammierung	25
3.1.2 Bewegungs-basierte Programmierung	26
3.1.3 Aufgaben-basierte Programmierung	29
3.2 Methoden der Prozess- und Gerätebeschreibung	37
3.2.1 Beschreibung von Prozessen	38
3.2.2 Beschreibung von Geräten	39
3.3 Erkennung und Behandlung von Fehlern bei Industrierobotersystemen	40
3.3.1 Fehler und Fehlerursachen bei Handhabung und Montage	40
3.3.2 Möglichkeiten zur Fehlererkennung bei Handhabung und Montage	41
3.3.3 Rückführung auf Fehlerursachen mittels FFM	45
3.3.4 Behandlung von Fehlern bei roboterbasierter Handhabung und Montage	47

3.4	Interaktion zwischen Mensch und Roboter	49
3.4.1	Kognitive und soziale sowie physische Mensch-Roboter-Interaktion	49
3.4.2	Klassifikation der physischen Mensch-Roboter-Interaktion	51
3.4.3	Absicherung der Mensch-Roboter-Interaktion	56
3.4.4	Zusammenfassung zur Mensch-Roboter-Interaktion	59
3.5	Interaktion des Roboters mit anderen Maschinen	59
3.6	Zusammenfassung der analysierten Methoden	60
4	Beschreibung des resultierenden Programmier- und Bedienkonzeptes	65
4.1	Fehleridentifikation	66
4.2	Strukturierte Roboterprogrammerstellung	68
4.2.1	Integration der Fehlererkennung	68
4.2.2	Notwendigkeit eines Umgebungsmodells	69
4.3	Interaktionskonzept	70
4.4	Gesamtablauf	70
5	Ausarbeitung der Systembestandteile	75
5.1	Fehleridentifikation	75
5.1.1	Formale Darstellung der Fehler und Fehlerursachen mittels FFM	75
5.1.2	Nutzung der FFM in der Überwachung von Prozessen	78
5.1.3	Berechnung der wahrscheinlichsten Fehlerursache	82
5.1.4	Implementierung der FFA	83
5.1.5	Fehlerbehandlung	86
5.2	Taskbeschreibung	88
5.2.1	Einbindung der Fehlererkennung und -behandlung	88
5.2.2	Aufbau von Elemental Actions	89
5.2.3	Aufbau von Skills	90
5.2.4	Generieren kollisionsfreier Bahnen	93
5.3	Nutzerinteraktion	97
5.3.1	Nutzerinteraktion während der Kalibrierung	98
5.3.2	Nutzerinteraktion im Programmiermodus	100
5.3.3	Nutzerinteraktion im Modus Programmausführung	106
5.4	Umgebungsmodell	107
6	Implementierung und Validierung am Beispiel einer Montagezelle	109
6.1	Einführung zum Anwendungsfall	109
6.2	Umsetzung des Programmier- und Bedienkonzeptes	111
6.2.1	Demonstratoraufbau	111
6.2.2	Realisiertes Skillset	113
6.2.3	Nutzerinteraktion	117
6.3	Bewertung	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
7.1	Zusammenfassung	125
7.2	Vergleich mit konventionellen Programmierverfahren	127
7.3	Ausblick	128

Literaturverzeichnis	131
Anhang	147
A Grundlagen	149
A.1 Begriffe der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik	149
A.2 Kennzahlen zur FMEA	150
A.3 Ursache-Wirkung-Diagramm für Verschraubungen	151
A.4 Sicherheitsbezogene Standards und Richtlinien	152
A.5 KUKA LBR iiwa	153
B Ergänzungen zur Ausarbeitung	155
B.1 FFM für ausgewählte Einzelkomponenten	155
B.2 Resultierende FFM für Konfiguration Zweifingergreifer	159
B.3 Erzeugung der FFM-Konfiguration	160
B.4 Dijkstra Algorithmus	160
B.5 Basisvermessung mittels Handführung	161
B.6 Vergleichsmessung Positioniergenauigkeit	163
C Details zum Anwendungsfall	165
C.1 Qualitätskontrolle der Steuerkolbenpassung	165
C.2 Berechnung des Return on Investment	166