

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Vorgehensweise	4
2	Grundlagen	7
2.1	Mensch-Roboter-Kooperation in der Produktion	7
2.1.1	Entwicklung einer Morphologie	7
2.1.2	Stand der Forschung und prototypische Systeme	9
2.1.3	Anforderungen an ein Simulationssystem	24
2.2	Digitale Prozessplanung und Robotersimulation	27
2.2.1	Digitale Planung von Arbeitssystemen	27
2.2.2	Dreidimensionale Robotersimulation	29
2.2.3	Virtuelle und hybride Inbetriebnahme	31
2.3	Virtuelle und erweiterte Umgebungen	33
2.3.1	Einführung und Begriffsklärung	33
2.3.2	Dateneingabe	36
2.3.2.1	Trackingverfahren	36
2.3.2.2	Gestenerkennung	40
2.3.2.3	Space Mouse	40
2.3.2.4	Spracherkennung	41
2.3.3	Datenausgabe	42
2.3.3.1	Visuelle Ausgabe	42
2.3.3.2	Haptische Ausgabe	51
2.3.3.3	Auditive Ausgabe	53
2.3.4	Anwendungsbeispiele	54
2.3.4.1	Produktion	54
2.3.4.2	Industrierobotik	56
2.3.4.3	Autonome mobile Roboter	58
2.3.4.4	Telerobotik	59
2.3.4.5	Medizinische Robotik	60
2.3.4.6	Humanoide Robotik	61
2.4	Hand-Auge-Koordination	63
2.4.1	Motorik und Bewegungsablauf	63
2.4.2	Modellierung und Prädiktion	65
2.4.2.1	Gesetz von Fitts	65
2.4.2.2	Gezielte Bewegung nach Woodworth	67
2.4.2.3	Potenzgesetz der Übung	68

3 Arbeitssystemanalyse	69
3.1 Erweitertes Arbeitssystemmodell	69
3.2 Aufgabenanalyse für die Reinigung von Gussteilen	72
3.3 Arbeitsperson	75
3.3.1 Prozessbedingte Belastungen	75
3.3.2 Vergleichende Gefährdungsanalyse	76
3.3.3 Dauer und Höhe der Aktionskraft	77
3.3.4 Art der Krafteinleitung bzw. Griff-Art	78
3.3.5 Körperhaltung und Hand-Arm-Stellung	78
3.3.6 Arbeitsmittel und Arbeitsumgebung	79
3.4 Handhabungsroboter	81
3.4.1 Robotersystem	81
3.4.2 Greifer	83
3.5 Anwendung der Morphologie	85
4 Entwicklung eines Simulations-Rahmenwerks	87
4.1 Methodik	87
4.1.1 Allgemeine Anforderungen	87
4.1.2 Softwaretechnische Vorgehensweise	87
4.1.3 Systemarchitektur	88
4.2 Implementierung	91
4.2.1 Konsole zur Prozessdefinition und -bearbeitung	91
4.2.1.1 Eigenschaften	91
4.2.1.2 Klassen und Pakete	92
4.2.2 Server für kinematische Berechnungen	93
4.2.2.1 Eigenschaften	93
4.2.2.2 Klassen und Pakete	94
4.2.3 Client zur Visualisierung und Interaktion	95
4.2.3.1 Eigenschaften	95
4.2.3.2 Klassen und Pakete	96
4.2.3.3 Rendering	104
4.2.3.4 Semiotisches Modell	106
4.2.3.5 Dateneingabe	109
4.2.3.6 Physiksimulation	111
4.2.3.7 Akustiksimulation	112
4.2.4 Geometriedatenerzeugung	114
4.2.4.1 Roboter mit Greifer	115
4.2.4.2 Strahlpistole und Aktivierungsbereich	116
4.2.4.3 Kurbelgehäuse und Sandreste	118
4.2.4.4 Bodenplatte	119

5 Experimentelle Untersuchungen	121
5.1 Methodik	122
5.1.1 Experimentelle Variablen	122
5.1.3 Versuchsaufbau und -durchführung	122
5.1.3 Rahmenbedingungen bei der Versuchsdurchführung	124
5.1.4 Datenerfassung und -aufbereitung	125
5.1.4.1 Aufzeichnung und Sicherung	125
5.1.4.2 Datenaufbereitung	126
5.1.5 Datenauswertung	128
5.1.5.1 Anpassungsgüte	128
5.1.5.2 Statistische Signifikanz	128
5.1.5.3 Lineare Regression	131
5.1.5.4 Autoregression	132
5.1.5.5 Kalman-Filter	134
5.1.5.6 Systemdynamik	135
5.2 Vorversuch	138
5.2.1 Forschungsfragen	138
5.2.2 Versuchsdesign	138
5.2.2.1 Versuchspersonen	138
5.2.2.2 Ablauf	139
5.2.2.3 Sichtfeld und Interaktion	140
5.2.2.4 Unabhängige und abhängige Variablen	141
5.2.3 Ergebnisse	142
5.2.3.1 Benutzerleistung	142
5.2.3.2 Lineare Regression	144
5.2.3.3 Subjektiv erlebte Beanspruchung	145
5.2.3.4 Simulator-Krankheit und visuelle Ermüdung	146
5.2.3.5 Persönliche Präferenz	147
5.2.4 Diskussion	147
5.3 Hauptversuch	149
5.3.1 Forschungsfragen	149
5.3.2 Versuchsdesign	150
5.3.2.1 Versuchspersonen	150
5.3.2.2 Ablauf	150
5.3.2.3 Sichtfeld und Interaktion	153
5.3.2.4 Unabhängige und abhängige Variablen	154
5.3.3 Ergebnisse	157
5.3.3.1 Motorik und Hand-Auge-Koordination	157
5.3.3.2 Benutzerleistung	157
5.3.3.3 Lineare Regression	161

5.3.3.4	Geschwindigkeitsprofile	162
5.3.3.5	Bewegungstrajektorien	165
5.3.3.6	Systemdynamik	168
5.3.3.7	Subjektiv erlebte Beanspruchung	169
5.3.3.8	Persönliche Präferenz	171
5.3.4	Diskussion	171
6	Zusammenfassung und Ausblick	175
7	Literatur	181
	Abkürzungsverzeichnis	209
	Anhang A: Entwurfsmuster	210
	Anhang B: Verwendete Fragebögen	213
	Anhang C: Weitere Versuchsergebnisse	220