

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort.....	I
Bibliografische Beschreibung und Referat.....	II
Deutsche MTM-Vereinigung e. V.....	III
Eidesstattliche Erklärung.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
Formelverzeichnis .....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XI
Anlagenverzeichnis .....	XII
1 Einführung in die Thematik .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Zielstellung.....	2
1.4 Vorgehensweise.....	2
2 Begriffe und Definitionen.....	4
2.1 Das Arbeitssystemmodell.....	4
2.2 Der MTM-Prozessbaustein und das Arbeitsablaufmodell nach MTM.....	5
2.3 Die MTM-Prozessbausteinsysteme .....	8
2.3.1 MTM-1 .....	11
2.3.2 MTM-UAS .....	16
2.4 Systematik der MTM-Prozessbausteinsysteme .....	17
2.5 Die Prozesssprache MTM.....	18
2.6 TiCon Mehrstellenarbeit (MSA).....	19
2.7 Interaktionsszenarien der Mensch-Roboter-Kollaboration .....	20
2.7.1 Zelle.....	21
2.7.2 Koexistenz.....	21
2.7.3 Synchronisation.....	21
2.7.4 Kooperation.....	21
2.7.5 Kollaboration.....	22
2.8 Schutzprinzipien der Mensch-Roboter-Kollaboration.....	22

2.8.1	Sicherheitsbewerteter überwachter Halt .....	23
2.8.2	Handführung.....	24
2.8.3	Leistungs- und Kraftbegrenzung .....	25
2.8.4	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung.....	26
3	Die Prozesssprache MTM-MRK .....	29
3.1	Konzeptionelle Grundlagen .....	30
3.2	Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit.....	32
3.3	Definition der MRK-Prozessbausteine.....	33
3.3.1	Hinlangen .....	33
3.3.2	Greifen .....	40
3.3.3	Bringen.....	42
3.3.4	Fügen.....	45
3.3.5	Loslassen .....	47
3.4	Aufbau des Excel-Sheets.....	48
4	Praktische Anwendung der MTM-MRK Planungsmethodik .....	51
4.1	Leitfaden.....	51
4.2	Durchführung der MTM-MRK Planungsmethodik.....	60
4.2.1	Türmontage.....	60
4.2.2	Kolbenmontage.....	66
4.2.3	sensitives Fügen von Kegelradgetrieben.....	72
5	Fazit .....	79
	Literaturverzeichnis.....	83
	Anlagen .....	A

# Abkürzungsverzeichnis

---

EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet
HWD	Human Work Design
IMD	Internationales MTM-Direktorat
LMS	Lowry, Maynard, Stegemerten
MEK	MTM für Einzel- und Kleinserienfertigung
MOS	MTM Office System
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MSA	Mehrstellenarbeit
MTM	Methods-Time Measurement
PT	Prozesszeit
SD	Standarddaten
TMU	Time Measurement Unit
UAS	Universelles Analysiersystem

# Formelverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$K_a$	Faktor zur Berechnung der Beschleunigung beim Bringen	[-]
$M_A$	Antriebsmoment	[Nm]
$a_{mTCP}$	Beschleunigung des Endeffektors beim Bringen	[mm/s <sup>2</sup> ]
$a_{TCP}$	Beschleunigung des Endeffektors	[mm/s <sup>2</sup> ]
$a_{gr}$	Beschleunigung des Endeffektors beim Greifen	[mm/s <sup>2</sup> ]
$a_{max}$	maximale Beschleunigung	[mm/s <sup>2</sup> ]
$a_{rl}$	Beschleunigung des Endeffektors beim Loslassen	[mm/s <sup>2</sup> ]
$c_{a1}$	Koeffizient zur Berechnung der Beschleunigung	[1/s]
$c_{a2}$	Koeffizient zur Berechnung der Beschleunigung	[mm/s <sup>2</sup> ]
$d_{sl}$	Fügetiefe	[mm]
$l_1$	Abstand zwischen Drehachse und Ende des Roboterarms	[mm]
$l_2$	Abstand zwischen Drehachse und bewegtem Gegenstand	[mm]
$m_{RK}$	Masse der Roboterkinematik	[kg]
$m_{TCP}$	Masse am Endeffektor des Roboters	[kg]
$s_{bl}$	Wegstrecke für das Überschleifen von Bahnpunkten	[mm]
$s_g$	zurückgelegte Wegstrecke	[mm]
$s_{gr}$	zurückgelegte Wegstrecke beim Greifen	[mm]
$s_{rl}$	zurückgelegte Wegstrecke für das Loslassen	[mm]
$t_a$	Zeitanteil der Beschleunigung	[s]
$t_b$	Zeitanteil der Entschleunigung	[s]
$t_{bl}$	Zeitanteil zum Überschleifen von Bahnpunkten	[s]
$t_c$	Zeitanteil für die Kommunikation zwischen Robotersteuerung und Greifersteuerung	[s]
$t_e$	Zeit je Einheit	[s]
$t_g$	Grundzeit	[s]
$t_{gg}$	Gesamtzeit für das Greifen	[s]
$t_{gm}$	Gesamtzeit für das Bringen	[s]
$t_{gp}$	Gesamtzeit für das Fügen	[s]
$t_{gr}$	Gesamtzeit für das Hinlangen	[s]
$t_{grl}$	Gesamtzeit für das Loslassen	[s]
$t_s$	Ausschwingzeit	[s]
$t_{sl}$	approximierte Zeitkonstante für die Fügetiefe beim Fügen	[s]
$t_{sp}$	approximierte Zeitkonstante für Passungsklasse beim Fügen	[s]
$t_t$	Totzeit	[s]
$t_v$	Zeitanteil der konstanten Geschwindigkeit	[s]
$v_{TCP}$	Geschwindigkeit des Endeffektors	[mm/s]
$v_g$	Grenzggeschwindigkeit	[mm/s]
$v_{gr}$	Geschwindigkeit des Endeffektors beim Greifen	[mm/s]
$v_{rl}$	Geschwindigkeit des Endeffektors beim Loslassen	[mm/s]
$\theta_g$	zusammengefasstes Massenträgheitsmoment	[kg*m <sup>2</sup> ]
$b$	Radius des Überschleifens	[mm]

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Sprachelemente des MTM-Prozessbausteinsystems .....	5
Abbildung 2: Arbeitsablaufmodell nach MTM .....	7
Abbildung 3: Gesamtstruktur der anwendungsneutralen MTM-Prozessbausteinsysteme .....	8
Abbildung 4: Darstellung der MTM-Anwendung .....	13
Abbildung 5: Der Grundzyklus .....	14
Abbildung 6: Messung der Bewegungslänge .....	17
Abbildung 7: Vorgehensweise bei der Anwendung von TiCon MSA .....	20
Abbildung 8: Interaktionsszenarien der Mensch-Roboter-Kollaboration .....	20
Abbildung 9: Schutzprinzipien der Mensch-Roboter-Kollaboration .....	23
Abbildung 10: Schutzfeld bei einem Roboterbetrieb mit sicherheitsbewertetem überwachtem Halt .....	24
Abbildung 11: Handführung eines Zellenabschnitts bei einem Flugzeug .....	25
Abbildung 12: Das Körpermodell .....	26
Abbildung 13: Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung bei einem Leichtbauroboter .....	27
Abbildung 14: Ablauf der MTM-MRK Planungsmethodik .....	31
Abbildung 15: Allgemeine Kodierung der MRK-Prozessbausteine .....	33
Abbildung 16: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm mit der Unterteilung der Bewegungszeiten für eine lineare Roboterbewegung .....	35
Abbildung 17: Überschleifen des Bahnpunktes $P_j$ .....	38
Abbildung 18: Geschwindigkeitsdiagramme für die einzelnen Bewegungsfälle .....	39
Abbildung 19: Kodierung des MRK-Prozessbausteins Hinlangen (Reach) .....	40
Abbildung 20: Geschwindigkeitsverlauf der Finger bei einer positionsgeregelten Schließbewegung .....	41
Abbildung 21: Kodierung des MRK-Prozessbausteins Greifen (Grasp) .....	42
Abbildung 22: Bewegung um das Drehgelenk .....	43
Abbildung 23: Kodierung des MRK-Prozessbausteins Bringen (Move) .....	45
Abbildung 24: Kodierung des MRK-Prozessbausteins Fügen (Position) .....	47
Abbildung 25: Kodierung des MRK-Prozessbausteins Loslassen (Release) .....	48
Abbildung 26: Leitfaden für die Analyse von Mensch-Roboter- Kollaborationsarbeitsplätzen mit der MTM-MRK Planungsmethodik .....	52
Abbildung 27: Analyseblatt der Ablaufplanung für einen MRK-Arbeitsplatz .....	55
Abbildung 28: erster Schritt bei der Erstellung einer MSA-Analyse in TiCon .....	57
Abbildung 29: Erstellung der Ablaufstruktur des Fallbeispiels .....	58
Abbildung 30: grafische Struktur der Montageaufgabe .....	59
Abbildung 31: Montagelinie Türmontage .....	61
Abbildung 32: Ablaufbeschreibung der Türmontagestation in Mensch-Roboter- Kollaboration .....	62

Abbildung 33: Auswertung der MSA-Analyse „Türmontage“ .....	65
Abbildung 34: grafische Darstellung der Montageoperationen für die MSA-Analyse „Türmontage“ .....	66
Abbildung 35: Kolbenmontagestation .....	67
Abbildung 36: Ablaufbeschreibung der Kolbenmontagestation in Mensch-Roboter- Kollaboration .....	68
Abbildung 37: Auswertung der MSA-Analyse „Kolbenmontage“ .....	71
Abbildung 38: grafische Darstellung der Montageoperationen für die MSA-Analyse „Kolbenmontage“ .....	72
Abbildung 39: Montagestation Kegelradgetriebe .....	73
Abbildung 40: Ablaufbeschreibung der Montagestation für Kegelradgetriebe in Mensch- Roboter-Kollaboration.....	74
Abbildung 41: Auswertung der MSA-Analyse „Montage Kegelrad“ .....	76
Abbildung 42: grafische Darstellung der Montageoperationen für die MSA-Analyse „Montage Kegelrad“ .....	77

# Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Methodiken für die Entwicklung von MTM-Prozessbausteinsystemen .....	10
Tabelle 2: Umrechnungsfaktoren für die Umrechnung von TMU in andere Zeiteinheiten.....	15
Tabelle 3: Entfernungsbereiche der UAS-Grundvorgänge .....	17
Tabelle 4: signifikante Einflussgrößen resultierend aus der Montageaufgabe und der Durchführungsart.....	32
Tabelle 5: Ausgangsformeln der Bewegungszeit für verschiedene Bewegungsfälle.....	38
Tabelle 6: Zeit für die Durchführung einer Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse .....	46
Tabelle 7: Zeit für das Überbrücken von bestimmten Fügetiefen.....	46
Tabelle 8: Identifikation der zeitbestimmenden Ressource.....	50

# Anlagenverzeichnis

---

Anlage 1: Die MTM-1 Datenkarte.....	A
Anlage 2: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein Hinlangen.....	B
Anlage 3: Berechnungsformeln für den MRK-Prozessbaustein Bringen.....	B