

Risikofaktor Mensch?

VDI-Fachausschuss
Menschliche Zuverlässigkeit und Sicherheit

Oliver Sträter (Hrsg.)

Risikofaktor Mensch?

Zuverlässiges Handeln gestalten

1. Auflage 2019

Herausgeber:
Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure e. V.

© 2019 Beuth Verlag GmbH

Berlin · Wien · Zürich

Saatwinkler Damm 42/43

13627 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden von Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

© für VDI-Richtlinien VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf

Titelbild: © JARIRIYAWAT, Benutzung unter Lizenz von shutterstock.com

Satz: Beuth Verlag GmbH, Berlin

Druck: COLONEL, Kraków

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISBN 978-3-410-29548-8

ISBN (E-Book) 978-3-410-29549-5

7 Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit für manuelle Montagetätigkeiten

Robert Refflinghaus & Christian Kern

Einordnung

Während sich Fehlerraten von Maschinen und Robotern regelmäßig im Promillebereich bewegen, fällt bei manuellen Montagetätigkeiten auf, dass manche Arbeitsschritte deutlich fehleranfälliger sind als andere. Da eine prospektive Auseinandersetzung mit der Zuverlässigkeit des Menschen im Montageprozess in der betrieblichen Praxis bisher weitestgehend vernachlässigt wurde, stellt der folgende Beitrag einen prozessorientierten Ansatz zur qualitativen und quantitativen Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei manuellen Montagetätigkeiten im Bereich der Serienfertigung vor.

7.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Manuelle Montagetätigkeiten sind ein grundlegendes Element der industriellen Wertschöpfungskette und nehmen je nach Produkt bis zu 70% der Gesamtfertigungszeit in Anspruch. Hinsichtlich der Leistungserstellung eines Unternehmens steht die manuelle Montage in der Regel an der letzten Stelle der Wertschöpfungskette und stellt damit ein Sammelbecken für die organisatorischen, terminlichen und qualitativen Fehler des gesamten Produktentstehungsprozesses dar (Brecher & Schapp 2009). Ferner haben verkürzte Produktlebenszyklen sowie wachsende Qualitätsansprüche der Kunden in den letzten Jahren zu steigenden Anforderungen an die Planung manueller Montageprozesse geführt. Die Erfüllung des aus den aufgezeigten Sachverhalten resultierenden enormen Qualitätsanspruchs der manuellen Montage wird wesentlich durch die Qualifikation der Mitarbeiter, durch das Ausschließen von fehlerbegünstigenden Situationen und durch die Aufgabenkomplexität der Montageaufgabe bestimmt. Für einen effizienten Arbeitsprozess ist daher die detaillierte Planung aller manuell auszuführenden Arbeitsschritte von zentraler Bedeutung.

Betrachtet man den prinzipiellen Ablauf der Montageplanung, so zeigt sich, dass die Methoden und Ansätze der Arbeits- und Qualitätsplanung zwar beide

im Prozess der Ausführungsplanung angewendet werden, bisher jedoch jeweils eigenständige Planungsbereiche darstellen (Refflinghaus & Kern 2013). Eine Integration der Methoden und die Nutzung von Synergieeffekten wurde trotz des bereichsübergreifenden Informations- und Aufgabencharakters bisher vernachlässigt, obwohl sich beide Planungsbereiche intensiv mit der Bewertung von Arbeitsabläufen beschäftigen und somit Potenzial für eine verkürzte und besser abgestimmte Vorplanung vorhanden ist.

Ein wesentliches Ziel der Qualitätsplanung ist die Schaffung stabiler Produktionsprozesse und die Verringerung der Anzahl von Fehlern in der Produktion. Übertragen auf manuelle Montageprozesse bedeutet dies, neben der Beherrschung der technischen Komplexität auch die Fehlbehandlungswahrscheinlichkeit des Mitarbeiters so weit wie möglich zu reduzieren. Das frühzeitige Erkennen von qualitätskritischen Arbeitsschritten stellt daher ein Schlüsselement zur Erzeugung stabiler und effizienter Produktionsprozesse dar.

Die Bewertung der Schwachstellen des Produktionsprozesses beschränkt sich bisher jedoch meist auf den technisch-ökonomischen Bereich, was zur Folge hat, dass manuelle Montageprozesse gegenwärtig vorrangig hinsichtlich einer optimalen Zeitnutzung geplant werden. Zur Modellierung manueller Montagetätigkeiten verwendet der Arbeitsplaner hierbei sogenannte „Systeme vorbestimmter Zeiten“ (SvZ). Diese stellen für ein präventives Qualitätsmanagement jedoch keine hinreichenden Methoden zur Verfügung. Daher fand eine proaktive Auseinandersetzung mit der Zuverlässigkeit des Menschen im Montageprozess in der betrieblichen Praxis bisher meist nicht statt.

Der aufgezeigten Problemstellung folgend ist es erstrebenswert, das Auftreten von Fehlern des im Produktionssystem agierenden Menschen quantitativ auf Grundlage der modellierten Abläufe abzubilden. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere eine Methode zur Montageprozessplanung zielführend, die die sich dynamisch entwickelnden Faktoren in der industriellen Produktion berücksichtigt und bereits in der Planungsphase eine prospektive Bewertung und Berücksichtigung der menschlichen Zuverlässigkeit bei der Ausführung manueller Montagetätigkeiten ermöglicht.

Im Rahmen dieses Kapitels wird daher eine neue Montageplanungsmethode vorgestellt, die Aspekte der Prozessgestaltung mit Aspekten der Qualitätsplanung zusammenführt und dadurch das Potenzial besitzt, menschliche Fehlbehandlungswahrscheinlichkeiten in der manuellen Montage systematisch vorherzusagen. Um den Aufwand der Verknüpfung von arbeitsplanerischen Verfahren zur Zeitermittlung und qualitätsplanerischen Verfahren zur Ermittlung von Fehlerwahrscheinlichkeiten in einem angemessenen Verhältnis zu dessen praktischem Nutzen und dessen praktischer Relevanz zu halten, liegt das Hauptaugenmerk der entwickelten Montageplanungsmethode MTQM

(Methods Time and Quality Measurement) auf der integrierten Planung von manuellen Montageaufgaben in höheren Stückzahlen an Arbeitsplätzen mit hohem Organisationsgrad und hohem Methodenniveau. Das Kapitel fokussiert somit die integrierte Zeit- und Fehlbehandlungsanalyse von manuellen Montagetätigkeiten der Serienfertigung.

Durch die prospektive Ermittlung der menschlichen Zuverlässigkeit im Montageprozess wird der Produktionsplaner in die Lage versetzt, notwendige Systemanpassungen bereits vor Inbetriebnahme des Montagesystems umzusetzen. Somit erhält der Montageplaner ein Werkzeug, das es ihm ermöglicht, fehleranfällige Montageschritte prospektiv zu identifizieren und deren Risikopotenzial quantitativ darzustellen. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend können kritische Prozessschritte schon bei der Erzeugnisgestaltung identifiziert und kostenintensive Umgestaltungen im laufenden Betrieb vermieden werden. Da die mit einer Umgestaltung von Montagearbeitsplätzen verbundenen Kosten mit jeder Phase des Planungsfortschritts stark ansteigen und Änderungen im laufenden Betrieb mit sehr hohem finanziellen Aufwand verbunden sind, trägt der Einsatz der neuen Methode zur integrierten Zeit- und Qualitätsplanung von Montageprozessen zudem dazu bei, wirtschaftliches Optimierungspotenzial, das durch Skaleneffekte bedingt in den untersuchten Fertigungsformen Serien- und Massenfertigung besonders ausgeprägt ist, zu erschließen. Somit trägt die neue Methode dazu bei, sowohl unter Zeit- als auch unter Qualitäts- und Kostenaspekten eine verbesserte Systemgestaltung zu fördern.

7.2 Intention und Entwicklung der Montage-Planungsmethode MTQM

Den Ausgangspunkt der Methodenentwicklung bildete die Erstellung von Prozessablaufanalysen für typische, in der Serienfertigung immer wieder auftretende manuelle Montagetätigkeiten (z. B. Herstellen einer Schraubverbindung, Montieren eines Normteils, Hammerarbeiten). Auf der Basis gängiger Systeme vorbestimmter Zeiten, die bereits heute breite Anwendung in der prospektiven Ermittlung von Vorgabezeiten für manuelle Montagetätigkeiten finden, wurde darauf aufbauend eine neuartige Methode erarbeitet, deren Ziel es ist, die Risikobewertung der auszuführenden Montagetätigkeiten prospektiv als zusätzliche Planungsgröße im Montageplanungsprozess berücksichtigen zu können. Damit wird in der Planungsphase nicht nur eine zeit-, sondern direkt auch eine qualitätsorientierte Auslegung des Montageprozesses möglich. Die Systeme vorbestimmter Zeiten wurden hierbei neben der Ermittlung von Vorgabezeiten auch genutzt, um anhand von Schlüsselreizwerten, sogenannten Cue-Motion-Werten (siehe Chaffin & Hancock 1966), die Komplexität und damit

die Fehleranfälligkeit einzelner Bewegungsfolgen einer manuellen Montage-tätigkeit einzuschätzen. Darüber hinaus stellt die Methode einen Katalog mit montagearbeitsplatzspezifischen leistungsbeeinflussenden Faktoren bereit, mit dem der Einfluss einzelner leistungsbeeinflussender Faktoren auf die Höhe der resultierenden Fehlerwahrscheinlichkeit analysiert werden kann. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde schließlich eine auf dem HRA-Verfahren ESAT (Expertensystem zur Aufgabentaxonomie) (siehe Brauser 1990, VDI 4006 Blatt 2 2015) basierende, jedoch speziell für das Anwendungsgebiet der industriellen Montage konzipierte Methode zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit bei manuellen Montagetätigkeiten entwickelt. Wesentliche Elemente der Methode sind montagespezifische Standardbegriffe, montagespezifische Vorgewichte, montagespezifische Belastungskomponenten sowie ein auf die niedrigen Fehlerraten der manuellen Montage adaptiertes Berechnungsmodell.

7.3 Durchführung von Zeit- und Risikoanalysen mit der MTQM-Methode

Die Quantifizierung von Zeitbedarfen und menschlichen Fehlerrisiken für die Ausführung von manuellen Montagetätigkeiten erfolgt im Rahmen der MTQM-Methode auf der Basis einer modifizierten Anwendung des Expertensystems zur Aufgabentaxonomie (ESAT).

Das ESAT ist ein für die Zuverlässigkeitsprognose von Überwachungs- und Kontrolltätigkeiten in sicherheitskritischen Bereichen (Luft- und Raumfahrt, Kerntechnik) entwickeltes, analytisches HRA-Verfahren (Human Reliability Analysis). Mit dem Verfahren lassen sich beliebige Aufgaben, die in einem Mensch-Maschine-System ausgeführt werden, nach der Zuverlässigkeit ihrer Durchführung klassifizieren (Brauser 1990). Abbildung 7.1 veranschaulicht den vierphasigen Prozessablauf des ESAT-Verfahrens.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die wesentlichen Inhalte des ESAT-Verfahrens und zeigen auf, welche Systemanpassungen im Zuge der Entwicklung der MTQM-Methode vorgenommen wurden, um das ESAT-Verfahren vom Anwendungsfeld der Analyse sicherheitskritischer Bereiche in Risikoindustrien auf den Bereich der manuellen Montage übertragen zu können.



Abbildung 7.1 Ablaufschritte des ESAT-Verfahrens

7.3.1 Aufgabenbeschreibung

Im ersten Verfahrensschritt muss die zu analysierende Aufgabe zunächst detailliert beschrieben werden, damit eine eindeutige Anweisung zur Durchführung der Aufgabe entsteht. Die Aufgabenbeschreibung verkörpert somit eine Arbeitsanweisung, die es einem Arbeitnehmer oder einem Probanden ermöglicht, die Arbeitsaufgabe ohne weitere Anweisungen auszuführen. Im Zuge der Erstellung der Aufgabenbeschreibung sind daher alle notwendigen Handlungen, mentalen Operationen, erforderlichen Wahrnehmungen und verwendeten Hilfsmittel zu erfassen und in einem Prozessablaufdiagramm zu hinterlegen. Abbildung 7.2 veranschaulicht die Vorgehensweise zur Erstellung einer Aufgabenbeschreibung am Beispiel der manuellen Montagetätigkeit „Herstellen einer Schraubverbindung“.

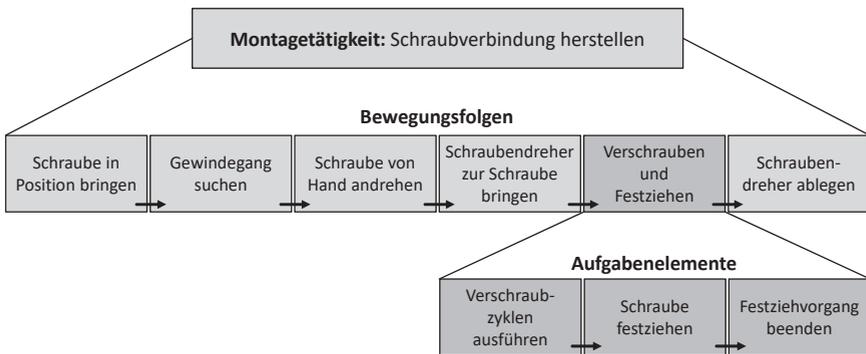


Abbildung 7.2 Aufgabenbeschreibung (Auszug)

7.3.2 Zeit- und Vorgewichtsermittlung

Die zweite Phase der ESAT-Methode befasst sich mit der verfahrenstechnischen Reflexion der zuvor erstellten Aufgabenbeschreibung. Das Ziel dieses Prozessschritts besteht darin, die vorhandene Aufgabenbeschreibung in eine standardisierte Sprache zu übersetzen, indem den einzelnen Elementen und Handlungsschritten der Aufgabenbeschreibung sogenannte ESAT-Standardbegriffe zugeordnet werden. Hierzu hält die ESAT-Datenbank (siehe Brauser 1990) etwa 200 Standardbegriffe bereit.

Da die ESAT-Datenbank oftmals nicht genug bzw. nicht immer die passenden Standardbegriffe bereithält, um die Aufgabenelemente einer zu untersuchenden manuellen Montagetätigkeit exakt in der ESAT-Prozesssprache ab-

zubilden, wurde das ESAT-Tabellenwerk im Zuge der Methodenentwicklung um ca. 40 montagespezifische Standardbegriffe erweitert (loses und enges Fügen, Festspannen). Anschließend wurden die neu gebildeten Standardbegriffe definierten Kategorien (Wahrnehmungen, Handlungen, Hilfsmittel, Detektionen, Mentale Operationen etc.) zugeordnet und mit umfassenden textuellen Erläuterungen versehen, um im Anwendungsfall eine eindeutige und reproduzierbare Begriffsauswahl sicherzustellen.

Aufbauend auf der verfahrenstechnischen Reflexion der Aufgabenbeschreibung müssen den einzelnen Aufgabenelementen der Arbeitsaufgabe Zeit- und Vorgewichtswerte zugewiesen werden. Hierfür sind in der ESAT-Datenbank neben Ausführungszeiten für die ESAT-Standardbegriffe der Kategorie „Handlungen“ für alle Standardbegriffe Vorgewichte enthalten, die Werte zwischen eins und zehn annehmen können (vgl. Abbildung 7.3). Anhand der Vorgewichte kann der Anwender eine erste Abschätzung des Risikopotenzials der betrachteten Arbeitsaufgabe vornehmen.

Da die in der ESAT-Datenbank enthaltenen Vorgabezeiten für die Ausführung einzelner Handlungselemente auf Zeitmessungen von selten auszuführenden Überwachungs- und Kontrolltätigkeiten basieren, die der Einmalfertigung entsprechen, waren diese für den angestrebten Anwendungsfall (manuelle Montagetätigkeiten der Serienfertigung) ungeeignet. Zur Verbesserung der Prognosegüte des Verfahrens wurden die in den ESAT-Tabellen enthaltenen Vorgabezeitwerte daher durch normierte MTM-Zeitwerte ersetzt, wodurch eine Anpassung der Elementarzeiten an die montagespezifischen Rahmenbedingungen der Serienfertigung erreicht werden konnte. Hierzu wurde neben dem MTM-1-Verfahren (siehe Britzke 2013), das sich auf die Analyse von einzelnen Grundbewegungen stützt und bei dem die Ermittlung der Vorgabezeit für eine Arbeitsaufgabe über das Aufsummieren der tabellierten Zeitwerte der einzelnen Grundbewegungen erfolgt, vorwiegend das für die Serienfertigung entwickelte MTM-UAS-Verfahren genutzt (siehe Bokranz & Landau 2012), das mehrere montagespezifische Grundbewegungen zu häufig vorkommenden, größeren Bewegungsbausteinen verdichtet. Um Zeitvorgaben für eigenständig zeitbestimmende mentale Bestandteile einer manuellen Montageaufgabe kalkulieren zu können, wurde ferner das speziell für die Analyse mentaler Arbeitsinhalte konzipierte System vorbestimmter Zeiten „Work Factor Mento“ (siehe WF-C 2015) herangezogen. Die Zeitanalyse basiert somit im Wesentlichen auf der Nutzung der Systeme vorbestimmter Zeiten „Methods Time Measurement“ (MTM) und „Work Factor“ (WF). Um die zu analysierenden Arbeitsinhalte mit den genannten Systemen vorbestimmter Zeiten abbilden zu können, muss die erstellte Aufgaben-

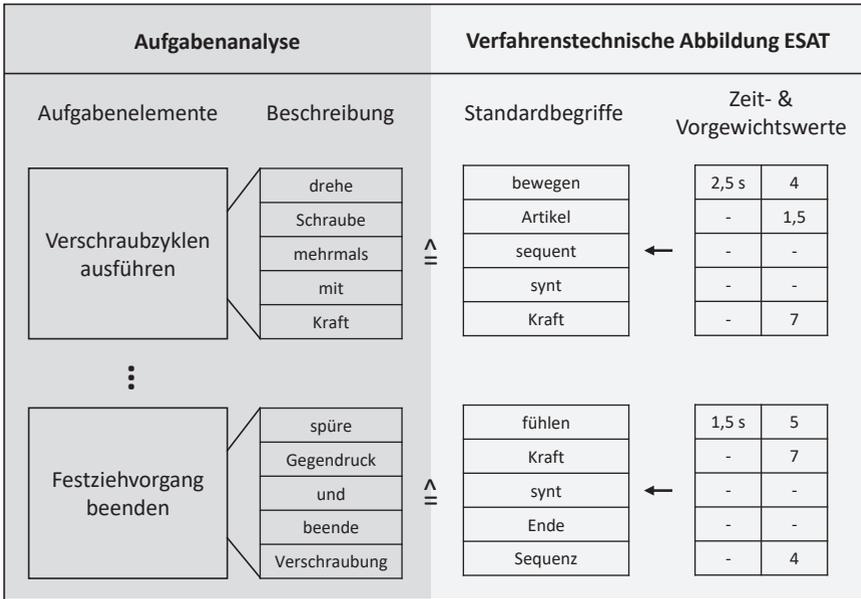


Abbildung 7.3 Verfahrenstechnische Reflexion der Aufgabenbeschreibung (Auszug)

beschreibung zunächst in unternehmensspezifische Prozessbausteine, sogenannte Standard-Bewegungsfolgen (SBF), untergliedert werden. Abbildung 7.4 veranschaulicht die Zeitenttransformation der motorischen Bestandteile einer Arbeitsaufgabe am Beispiel der manuellen Montagetätigkeit „Schraubverbindung herstellen“.

Da für die Analyse der motorischen Bestandteile manueller (Montage-)Tätigkeiten der Serienfertigung bevorzugt das MTM-UAS-Bausteinsystem angewendet wird, sind die erzeugten Standard-Bewegungsfolgen so zu gestalten, dass diese in ihrem Umfang dem Verdichtungsgrad der Grundvorgänge des MTM-UAS-Verfahrens (z. B. aufnehmen und platzieren, Hilfsmittel handhaben, betätigen) entsprechen. Nachdem der Arbeitsablauf in Standard-Bewegungsfolgen untergliedert wurde, müssen Rahmenbedingungen und aufgabenspezifische Einflussgrößen erfasst werden, unter denen der untersuchte Bewegungsablauf stattfindet. Dabei sind Kenntnisse über die Arbeitsplatzsituation, die Reihenfolge einzelner Tätigkeiten und die im Zuge der Tätigkeitsausführung verwendeten Hilfsmittel und Gegenstände (z. B. Werkstücke, Werkzeuge, Vorrichtungen) notwendig. Darüber hinaus ist eine Beschreibung der Einflussgrößen erforderlich, die eine unmittelbare Auswirkung auf den Schwierigkeitsgrad und

somit auch auf den erforderlichen Zeitbedarf der analysierten Montagetätigkeit haben (z. B. Teilgewicht, Platziergenauigkeit). Darauf aufbauend erfolgt die Zeitanalyse der motorischen Bestandteile des betrachteten Montagevorgangs anhand der Grundvorgänge des MTM-UAS-Verfahrens. Um eine Zuordnung von MTM-Vorgabezeitwerten zu ESAT-Standardbegriffen zu ermöglichen, erfolgt im nächsten Schritt eine Verknüpfung der generierten Standardbewegungsfolgen der untersuchten manuellen Montagetätigkeit mit den in der MTM-Analyse enthaltenen MTM-UAS-Bewegungsbausteinen. Da jede Standardbewegungsfolge aus mehreren Aufgabenelementen besteht, können die aus der MTM-UAS-Analyse resultierenden Vorgabezeitwerte anschließend auf die entsprechenden Aufgabenelemente aufgeteilt werden. Hierzu müssen im Vorfeld der Zeitentransformation die ESAT-Zeiteinheit (1/10 s) und die MTM-Zeiteinheit (TMU; 1 TMU = 0,036 s) auf eine einheitliche Datenbasis Sekunden (s) gebracht werden.

Tabelle 7.1 Zeitentransformation für motorische Aufgabenelemente

Neue zugeordnete ESAT Zeit	MTM - Gesamtzeit	Verteilzeit	MTM-Zeit	ESAT-Zeit	Aufgabenelemente	
0,1	2,574	0,234	2,34	0,4	Schraube aufnehmen	
0,8				2,5	Schraube in den Arbeitsbereich holen	
0,8				2,5	Schraube zur Positionierstelle bringen	
0,2				0,6	Schraube anfügen	
0,2				0,6	Gewindegang suchen	
0,5	MTM-UAS-Element AF 2			1,75	Gewindegang finden	
2,6				8,35	Zeitwert Standardbewegungsfolge (SBF)	
0,8	0,792	0,072	0,72	0,6	Einschraubzyklus durchführen	
	MTM-UAS-Element ZB 1					
0,8				0,6	Zeitwert Standardbewegungsfolge (SBF)	
0,1	2,772	0,252	2,52	0,4	Schraubendreher aufnehmen	
0,6				2,5	Schraubendreher in den Arbeitsbereich holen	
0,6				2,5	Schraubendreher ansetzen	
0,4				1,75	Schraubendreher anfügen	
0,6				MTM-UAS-Element HC 2	2,5	Schraubendreher in die Vorrichtung platzieren
0,5					2	
2,8				11,65	Zeitwert Standardbewegungsfolge (SBF)	
1,1	2,574	0,234	2,34	1,8	Verschraubzyklus durchführen	
0,4				MTM-UAS-Elemente ZA 1 + ZB 1 + ZD	0,6	Schraube festziehen
1,2					2	Festziehvorgang beenden
2,6					4,4	Zeitwert Standardbewegungsfolge (SBF)

Um die Funktionalität des ESAT-gestützten Berechnungsmodells zur Ermittlung des Risikopotenzials einer manuellen Montagetätigkeit aufrechterhalten zu können, ist bei der Zeitentransformation darauf zu achten, dass die ursprünglichen Zeitverhältnisse der einzelnen Aufgabenelemente der betrachteten Montagetätigkeit zueinander auch bei bzw. nach der Zuweisung neuer Zeitwerte erhalten bleiben. Die Zeitentransformation erfolgt daher nach folgendem Schema:

Neuer Zeitwert (AE) = (ESAT-Zeit (AE)/Zeitwert (SBF)) · MTM-Gesamtzeit (UAS-Element)

Die entwickelte Formel soll im Folgenden am Beispiel der Zeitentransformation für das Aufgabenelement „Schraube aufnehmen“ verdeutlicht werden:

Neuer Zeitwert (Schraube aufnehmen) = $(0,4 \text{ s}/8,35 \text{ s}) \cdot 2,574 \text{ s} = 0,12 \text{ s}$

Obwohl dem Aufgabenelement „Schraube aufnehmen“ durch die Zeitentransformation ein deutlich geringerer und damit realistischer Vorgabezeitwert zugewiesen wurde (0,12 s anstatt 0,4 s), bleibt der Zeitanteil des Aufgabenelements bezogen auf die Gesamtzeit der Standardbewegungsfolge erhalten ($0,4 \text{ s}/8,35 \text{ s} = 0,047$; $0,047 \cdot 2,6 \text{ s} = 0,12 \text{ s}$).

Im Zuge einer ganzheitlichen Zeitanalyse von manuellen Montagetätigkeiten müssen neben der Ermittlung von Vorgabezeiten für die motorischen Bestandteile der Arbeitsaufgabe auch Zeitvorgaben zur Bewältigung der mentalen Bestandteile der Arbeitsaufgabe bestimmt werden, sofern diese eigenständig zeitbestimmend sind. Für die Zeitanalyse der mentalen Vorgänge einer Arbeitsaufgabe (z. B. Zeichnung lesen, Prüfentscheidung treffen, Baumuster merken und mental abrufen) wird ergänzend zur Analyse der motorischen Bestandteile der Arbeitsaufgabe das WF-Mento-Verfahren genutzt.

Die Zeitanalyse erfolgt für alle betrachteten (manuellen) Montagetätigkeiten somit zweigeteilt. Zunächst wird jedes Montageprofil hinsichtlich des Auftretens motorischer Aufgabenelemente untersucht und mit den jeweils am besten geeigneten Systemausprägungen des MTM-Verfahrens analysiert. Anschließend erfolgt eine Zeitbedarfsanalyse der mentalen Aufgabenelemente der untersuchten Montagetätigkeiten unter Zuhilfenahme des WF-Mento-Verfahrens. Aufgrund des sehr hohen Detaillierungsgrads des WF-Mento-Verfahrens erfolgt die Bestimmung der Ausführungszeiten für die mentalen Bestandteile der betrachteten Arbeitsaufgabe (identifizieren etc.) unmittelbar innerhalb des genannten Systems vorbestimmter Zeiten. Anschließend werden die ermittelten Zeitwerte mit den in der Aufgabenbeschreibung enthaltenen ESAT-Standardbegriffen der Kategorie „Mentale Operationen“ verknüpft. Um eine spätere Verwendbarkeit der Zeitdaten vorzubereiten, müssen die ermittelten Zeitwerte – ebenso wie dies bereits für die ESAT- und MTM-Zeitwerte erfolgt ist – von der WF-Zeiteinheit (ZE; 1 ZE = 0,0001 min) in die Zeiteinheit Sekunden (s) umgewandelt werden. Tabelle 7.2 zeigt das Ergebnis der beschriebenen Vorgehensweise für die mentalen Bestandteile der betrachteten manuellen Montagetätigkeit „Schraubverbindung herstellen“.

Die Zeitanalyse abschließend werden die Zeitanteile der motorischen Aufgabenelemente der Arbeitsaufgabe (TMU-Werte) und die Zeitanteile der mentalen Aufgabenelemente der untersuchten Montagetätigkeit (ZE-Werte) durch Addition zum Vorgabezeitwert für die Ausführung der Arbeitsaufgabe verknüpft.

Tabelle 7.2 Zeitentransformation für mentale Aufgabenelemente

Neue zugeordneter WF- Zeitwert	WF-Mento-Element	ESAT-Zeit	Aufgabenelemente
0,9	[Fo 4 -3] + [Kd 45*] + [Rea A -5]	1	Behälter identifizieren
0,8	[Fo 4 -2] + [ES 30] + [Rea A -5]	1	Positionierstelle identifizieren
0,6	[Kd 45*] + [Rea A-4]	1	Schraubendreher identifizieren

Da für zahlreiche Standardbegriffe der ESAT-Datenbank lediglich Wertebereiche und keine eindeutig definierten Vorgewichtswerte existierten, und darüber hinaus keine Vorgewichtswerte für die der Datenbank neu hinzugefügten, montagespezifischen Standardbegriffe vorlagen, musste die bisher geschaffene Datenbasis im nächsten Schritt der Verfahrensanpassung um montagespezifische Vorgewichtswerte erweitert werden.

Die Ermittlung montagespezifischer Vorgewichtswerte der Kategorie „Handlungen“ stützte sich auf die Untersuchungen von Chaffin und Hancock zur Bestimmung sogenannter Schlüsselreizwerte (Cue Motion-Werte, CM-Werte) (siehe Chaffin & Hancock 1966). Unter diesen Schlüsselreizwerten werden Steuerungsinformationen verstanden, die durch Lernen im Gedächtnis gespeichert und dort wieder abgerufen werden, um eine MTM-Grundbewegung auszuführen (Bokranz & Landau 2012). Die Ausführung von Grundbewegungen wird demnach über den mentalen Abruf von Schlüsselreizinformationen gesteuert, die mit der auszuführenden Bewegung gekoppelt sind (Kiesel & Koch 2012). Je größer der CM-Wert einer Bewegung ist, desto umfangreicher ist die durch ihn repräsentierte Schlüsselreizinformation, die aus dem Gedächtnis abgerufen werden muss, um die entsprechende Bewegung zu erlernen und auszuführen. Folglich werden schwieriger auszuführenden MTM-Grundbewegungen größere CM-Werte zugeordnet. Schlüsselreizwerte nach Chaffin und Hancock (1966) stellen somit einen Indikator für die Aufgabenkomplexität verschiedener Grundbewegungen einer Arbeitsaufgabe dar und fungieren im Rahmen der entwickelten Montageplanungsmethode als Indikator für die Fehleranfälligkeit der mit einem montagespezifischen ESAT-Standardbegriff verbundenen Handlung. Somit basiert die Vorgewichtsermittlung in ihren Grundzügen auf dem etablierten und weitreichend validierten MTM-Verfahren, wodurch die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der ermittelten montagespezifischen Vorgewichtswerte gegeben ist.

Um Vorgewichtswerte für neu definierte montagespezifische Standardbegriffe der Kategorie „Hilfsmittel“ zu definieren, wurde für die oben beschriebene Vorgehensweise ergänzend ein umfangreicher Kriterienkatalog erstellt (siehe Refflinghaus & Kern 2012), mit dem anhand von Experteninterviews normierte Vorgewichtswerte für Hilfsmittel bestimmt werden konnten. Nach der Definition montagespezifischer Standardbegriffe und der Auswahl von geeigneten Beurteilungskriterien aus dem o. g. Kriterienkatalog (notwendiger Kraftaufwand, erforderlicher Übungsgrad, notwendiger Kontrollaufwand etc.) erfolgte in der Expertenrunde anhand von paarweisen Vergleichen (siehe David 1988) zunächst die Ausprägung der Einzelkriterien, bevor diese dem Bewertungsprozess abschließend zu Vorgewichtswerten für die neu definierten Standardbegriffe zusammengeführt wurden.

7.3.3 Ermittlung des Belastungsvektors

Der dritte Schritt des ESAT-Verfahrens befasst sich mit der Ausprägung des Belastungsvektors. Dieser verfolgt das Ziel, im Rahmen der Analyse sämtliche Faktoren zu erfassen, die die Leistungsfähigkeit des Menschen bei der Aufgabenausführung potenziell negativ beeinflussen. Der zu erstellende Belastungsvektor setzt sich dabei aus mehreren leistungsbeeinflussenden Faktoren (Performance Shaping Factors – PSF) zusammen, die nach dem ESAT-Verfahren in fünf voneinander unabhängige PSF-Gruppen untergliedert sind (siehe Brauser 1992):

- Aufgabentyp (PSF 1): Handlung, Mentale Operation ...
- Aufgabencharakteristika (PSF 2): Komplexität, Schwierigkeit ...
- Personalfaktoren (PSF 3): Erfahrung, Motivation ...
- Umgebungsfaktoren (PSF 4): Klima, Lärm, Verschmutzung ...
- Systemfaktoren (PSF 5): Organisation, Arbeitsdauer ...

Die Ausprägung des Belastungsvektors erfolgt, indem jeder einzelnen PSF-Komponente Zahlenwerte zwischen 0 (übt bezogen auf die betrachtete Arbeitsaufgabe keinen leistungsmindernden Einfluss aus) und 1 (übt einen sehr starken Einfluss aus) zugeordnet werden.

Im Zuge der Entwicklung der MTQM-Methode wurden zweistufige Sensitivitätsanalysen durchgeführt, in deren Verlauf der Einfluss der Elementarzeiten, der Vorgewichte und des Belastungsvektors auf die Höhe der ermittelten Fehlerwahrscheinlichkeit untersucht wurde. Im Ergebnis zeigte sich, dass der Belastungsvektor den mit Abstand größten Einfluss auf die Fehlerwahrscheinlichkeit ausübt. So führte die Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit für

sechs exemplarisch untersuchte manuelle Montagetätigkeiten bei extremer Ausprägung der leistungsbeeinflussenden Faktoren (für die niedrige Ausprägung wurden alle berücksichtigten Komponenten des Belastungsvektors auf 0 gesetzt, für die hohe Ausprägung nahmen alle Komponenten den Maximalwert 1 an) zu Fehlerraten, die um ca. das 30-Fache voneinander abwichen. Bezüglich der weiteren, in den ESAT-Berechnungsprozess eingehenden Größen (Elementarzeiten, Vorgewichte) ergaben sich durch die Variation der Faktorausprägungen auf ihre jeweiligen Extremwerte dagegen Fehlerraten, die maximal um den Faktor 4 voneinander abwichen.

Um bei der folgenden Berechnung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit realitätsnahe Werte zu erzielen, empfiehlt es sich bei der Anwendung des klassischen ESAT-Verfahrens, aufgrund des überproportional hohen Einflusses des Belastungsvektors auf das Berechnungsergebnis, nicht mehr als drei bis fünf PSF-Komponenten mit von null abweichenden Werten auszuprägen (Brauser 1990; Refflinghaus & Kern 2012).

Um bei der Analyse manueller Montagetätigkeiten sämtliche Faktoren, die potenziell einen negativen Einfluss auf die menschliche Zuverlässigkeit bei der Aufgabenausführung ausüben, vollständig berücksichtigen zu können, ist es notwendig, nahezu alle im ESAT-Verfahren hinterlegten allgemeinen Umgebungsfaktoren (z. B. Licht, Lärm, Klima) einzubeziehen. Gleiches gilt für eine Reihe weiterer montagearbeitsplatzspezifischer Faktoren (z. B. ergonomische Bedingungen am Arbeitsplatz, Ausgestaltung des Materialflusses, Eignung der eingesetzten Werkzeuge und Hilfsmittel), die als potenziell leistungsmindernd im Berechnungsprozess zu berücksichtigen sind. Um dies gewährleisten zu können, wurde anhand einer Analyse der in den Verfahrensbeschreibungen mehrerer etablierter HRA- und SvZ-Verfahren: THERP (siehe Swain & Guttman 1983), CAHR (siehe Sträter 1997), SLIM (siehe Embrey 1983), MTM (siehe Britzke 2013), WF (siehe WF-C 2015) etc.) enthaltenen leistungsbeeinflussenden Faktoren ein montagespezifischer Belastungsvektor generiert, der sich aus etwa 40 Einzelkomponenten zusammensetzt (vgl. Abbildung 7.4).

Aufbauend auf der Entwicklung des montagespezifischen Belastungsvektors wurde anhand von empirischen Reihenuntersuchungen ein mathematisches Modell erarbeitet, mit dem über einen jeweils aufgabenspezifischen Vorfaktor der Einfluss des Belastungsvektors so austariert werden kann, dass dieser sich auf dem Niveau der übrigen Stellschrauben des Berechnungsprozesses befindet (siehe Refflinghaus & Kern 2015). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, sämtliche bei der Ausführung einer manuellen Montagetätigkeit auftretenden Belastungen in der Risikoanalyse adäquat abzubilden.

Zeitbezug	Montagespezifischer Belastungsvektor	Umweltfaktoren
- Wahrnehmung - Detektion - ...		- Lärm: Lautstärke, Dauer etc. - Räumliche Beschaffenheit - ...
Aufgabencharakteristik		Systemfaktoren
- Komplexität - Schwierigkeit - ...		- Mensch-Maschine-Schnittstelle - Zeitstress/Zeitdruck - ...
Pufferfaktoren		Arbeitsschutz
- Präzision der Aufgabenstellung - Präzisierung der Arbeitsmethode - ...		- Beschilderung/Kennzeichnung - Persönliche Schutzausrüstung - ...
Aufgabenbezogene Faktoren		Ermüdungsfaktoren
- Korrigierbarkeit/Fehlerkorrektur - Prüffintensität - ...		- Physisches Ermüdungspotenzial - Psychisches Ermüdungspotenzial - ...
Personalfaktoren		Motivation
- Erfahrung/Übung - Reaktionsgeschwindigkeit - ...		- Einfluss der Motivation auf die Leistungsfähigkeit - ...

Abbildung 7.4 Montagespezifischer Belastungsvektor (Auszug)

7.3.4 Prognose der Fehlerwahrscheinlichkeit

Aufbauend auf der Ermittlung des Belastungsvektors kann in der letzten Phase des ESAT-Verfahrens die Fehleranfälligkeit der betrachteten Montagetätigkeit prognostiziert werden. Hierzu wird die Arbeitsaufgabe, unter Einbeziehung von empirisch validierten Berechnungsformeln (siehe Brauser 1990), zunächst in eine von zehn Zuverlässigkeitsklassen (ZK) einsortiert, bevor abschließend der mit der Arbeitsaufgabe korrespondierende Fehlerwahrscheinlichkeitswert (*HEP* – Human Error Probability) berechnet werden kann.

Da bei der Zuverlässigkeitsbewertung einer Vielzahl untersuchter manueller Montageprofile alle unter Risikoaspekten analysierten Montagetätigkeiten aus dem Bereich der Serienfertigung bei Zugrundelegung des ESAT-Berechnungsmodells in die Zuverlässigkeitsklasse 1 eingeordnet wurden, konnte der

Montageplaner über die Zuverlässigkeitsklasseneinteilung des ESAT-Verfahrens bisher keinen belastbaren Vergleich der Fehleranfälligkeit alternativer Planungsvarianten vornehmen. Um auch sehr kleine, für die manuelle Montage typische Fehlerraten innerhalb des Verfahrens adäquat abbilden und bewerten zu können, war es daher erforderlich, die Einordnung der betrachteten Arbeitsaufgabe in eine von zehn Zuverlässigkeitsklassen zu überarbeiten und montagespezifische, an die niedrigen Fehlerraten der Serienfertigung angepasste Zuverlässigkeitsklassen zu definieren. Diesbezüglich lag der Schwerpunkt der Neuausrichtung der Zuverlässigkeitsklasseneinteilung insbesondere auf einer feineren Untergliederung der unteren Zuverlässigkeitsklassen (ZK 1 bis ZK 3). Methodisch basierte die Neueinteilung der Zuverlässigkeitsklassen auf der Vorgehensweise zur Erstellung der ZK-Skala des ESAT-Verfahrens und bewirkte im Ergebnis beispielsweise eine Aufspaltung der ESAT-Zuverlässigkeitsklasse 1 in zehn montagespezifische Zuverlässigkeitsklassen mit monoton ansteigender Intervallbreite (vgl. Abbildung 7.5).

Die Neueinteilung der Zuverlässigkeitsklassen ermöglicht dem Montageplaner auch bei sehr niedrigen Fehlerraten sowie bei ähnlichen Fehlerraten alternativer Planungsvarianten über das verwendete Farbschema eine vergleichende Risikobewertung auf einen Blick und unterstützt ihn damit sowohl bei der Entscheidungsfindung als auch bei der Definition und Umsetzung von (Prozess-) Optimierungsmaßnahmen.

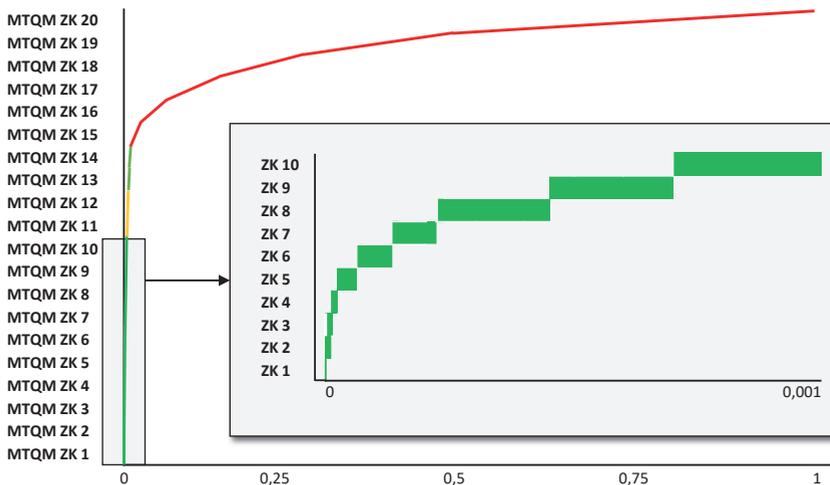


Abbildung 7.5 Montagespezifische Zuverlässigkeitsklassen

7.4 Weiterführende Funktionalitäten der MTQM-Methode

Neben der ausführlich vorgestellten Zuverlässigkeitsanalyse, die das zentrale Element der entwickelten MTQM-Methode darstellt, bietet die prozessorientierte Montageplanungsmethode MTQM eine Reihe weiterführender Funktionalitäten, die dem Anwender im Planungsprozess eine ganzheitliche Untersuchung und Optimierung von manuellen Montageprozessen ermöglichen. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die wichtigsten Module und Funktionalitäten der MTQM-Methode:

7.4.1 Fehleranalyse

Als Grundlage für die spätere Untersuchung der Fehlerrisiken muss untersucht werden, welche Handlungsfehler bei der Ausführung einer manuellen Montage-tätigkeit durch die enthaltenen Bewegungen, Montagekomponenten, Betriebs- und Hilfsmittel möglich sind und welchen Einflussgrößen das Fehlerauftreten unterliegt. Um das potenzielle Fehlergeschehen vollständig zu erfassen, kommen im Rahmen der MTQM-Methode mehrere Fehlerklassifikationen, die im Zuge der Methodenentwicklung um montagespezifische Fehlerkategorien (z.B. Handhabungsfehler, mentale Fehler) erweitert wurden, sowie Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen und Ursache-Wirkungs-Diagramme zum Einsatz (siehe Swain & Guttman 1983; Hacker 2005; Tietjen & Müller 2011).

Anhand der Fehleranalyse kann der Anwender qualitative Informationen zur Fehleranfälligkeit der untersuchten Arbeitsaufgaben ableiten. Diese müssen im Rahmen der Risikoanalyse der MTQM-Methode anschließend um quantitative Daten ergänzt werden.

7.4.2 Monetäre Bewertung von Fehlerrisiken

Ein Vergleich verschiedener Varianten der Durchführung einer Montageaufgabe im Hinblick auf mögliche Fehlerrisiken erfordert ein Abwägen zwischen dem Aufwand, der mit der alternativen Gestaltung des Montagesystems verbunden ist, und dem Gewinn, der durch das geringere Fehlerrisiko realisiert werden kann. Aus diesem Grund wurde neben der beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung des Risikopotenzials einer manuellen Montagetätigkeit im Zuge der Methodenentwicklung ein Modell entwickelt, das anhand einer Prozessmatrix des betrachteten Montageprozesses die Bestimmung der zu erwartenden Kosten durch Montagefehler ermöglicht (siehe Refflinghaus & Kern 2014). Der Fokus des Kostenmodells, das auf einer modifizierten Anwendung der vom Fraunhofer IPA entwickelten Fehler-Prozess-Matrix (FPM) (siehe Schloske & Henke 2006) basiert, liegt dabei auf der Quantifizierung von internen Feh-

ler(folge)kosten (Ausschuss, Nacharbeit etc.). Entgegen der klassischen FPM, bei der die Quantifizierung der Prozessfehler (Auftritts- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten) auf der Basis von Interviews mit Vorarbeitern und Meistern am Fertigungsband erfolgt, ordnet die im Forschungsprojekt entwickelte Systematik den identifizierten (Montage-)Fehlern objektiv nachvollziehbare, reproduzierbare Fehlerwahrscheinlichkeitswerte zu. Diese werden, analog zur bereits aufgezeigten Vorgehensweise, mit dem für die manuelle Montage modifizierten ESAT-Verfahren ermittelt. Die Bestimmung der resultierenden Fehlerkosten erfolgt anschließend anhand von in der Vergangenheit dokumentierten Nacharbeitszeiten.

7.4.3 Dynamische Fehlerrisiken

Da es sich bei manuellen Montagetätigkeiten der Serienfertigung um Aufgaben handelt, bei denen in verstärktem Maße Lern- und Erfahrungseffekte zum Tragen kommen, kann bei der Ermittlung von Fehlbehandlungswahrscheinlichkeiten mit der MTQM-Methode auch untersucht werden, wie sich Lerneffekte auf die mit dem modifizierten ESAT-Verfahren prognostizierten Fehlerwahrscheinlichkeiten auswirken. Hierzu wurde im Zuge der Methodenentwicklung eine Prognoseformel (siehe Refflinghaus & Kern 2014) entwickelt, die – basierend auf dem gut erforschten Zusammenhang zwischen einem steigenden Übungsgrad und dem damit verbundenen sinkenden Zeitaufwand für eine Tätigkeitsausführung (siehe DeGreiff 2001) – eine Prognose des bisher wenig erforschten Zusammenhangs zwischen Lerneffekten und menschlichen Fehlbehandlungswahrscheinlichkeiten ermöglicht. Die entwickelte Prognoseformel, die in ihren Grundzügen auf dem Lernkurvenmodell von Ullrich (siehe Merkel & Winkler 2010) und der von R. B. Duffey entwickelten Formel zur Bestimmung der minimalen Fehlerwahrscheinlichkeit einer Arbeitsaufgabe (siehe Duffey & Saull 2008) basiert, weist durch ihre innere Struktur folgende charakteristische Eigenschaften auf:

- Mit steigender Übung sinkt die Fehlerwahrscheinlichkeit, bis ein konstantes Niveau erreicht wird.
- Die errechnete Fehlerwahrscheinlichkeit nimmt nie den Wert null an.
- Für Tätigkeiten mit höherem Anspruch (Komplexität, Arbeitsdauer etc.) bleibt die minimale Fehlerwahrscheinlichkeit bei Erreichen eines hohen Übungsgrads auf einem höheren Niveau als für Tätigkeiten mit niedrigerem Anspruch.
- Die Kurvensteigung ist abhängig vom (Komplexitäts-)Anspruch der Tätigkeit.

7.5 Anwendungsbeispiel

Zur Validierung der Montageplanungsmethode MTQM wurden menschliche Fehlbehandlungswahrscheinlichkeiten an den Mechatronikmontagelinien eines Getriebeherstellers mittels der MTQM-Methode prognostiziert. Anschließend wurden die prognostizierten Fehlerraten durch die tatsächlich aufgetretenen Fehlerraten an den Prüfstationen der Linien validiert.

Zur Auswahl geeigneter Montageprofile wurde die MTQM-Methode dem Industriepartner vorgestellt. Dabei wurden folgende Anforderungen an die Montagestationen gestellt:

- typische Serienmontagetätigkeit mit einer Tätigkeitsdauer unter 2 min
- überschaubarer Prozess von ca. 20 Bewegungsfolgen
- Zeitbedarfsdaten, idealerweise MTM-Analysen, sind bereits vorhanden
- MTM-UAS typisch, keine Minibausteine
- keine sperrigen Bauteile, die manuell transportiert/verarbeitet werden müssen
- keine Mikrobauteile, die mit Pinzetten o. Ä. gehandhabt werden müssen
- Einsatz von Montagehilfsmitteln
- Fehleraufzeichnungen liegen als 100 %-Prüfung vor.

Insgesamt wurden sechs Montagestationen, die die genannten Anforderungen erfüllen, für die Anwendung der MTQM-Methode als geeignet identifiziert. Die betrachteten Stationen liegen in der Mechatronikmontage innerhalb eines Sauberkeits- und ESD-geschützten Bereichs. Sie wurden in ihrem Aufbau, ihren Betriebsmitteln und der Aufgabenstellung für weitere Linien des Unternehmens kopiert, sodass sich eine Optimierung einer Linie auf mehrere weitere Montagelinien auswirkt. Die Montagestationen liegen direkt hintereinander und werden von einem Mitarbeiter sequenziell bedient.

Im Rahmen der Validierung wurde die MTQM-Methode an zwei identischen Montagelinien angewandt, die bereits zwei Jahre zuvor den Start der Serienfertigung hatten. Anhand der unterschiedlichen Stückzahlen der Montagelinien ist der Übungsgrad der einen Linie bereits sehr hoch, wohingegen die andere Montagelinie eher dem Zustand kurz nach dem Anlauf mit einem geringen Übungsgrad entspricht. Die mittels MTQM prognostizierten Fehlerwahrscheinlichkeiten beschreiben die zu erwartenden Fehlerraten zum Zeitpunkt des Anlaufens einer Linie. Diese können aufgrund von Übung und Erfahrung sinken. Durch einen Vergleich der mittels MTQM prognostizierten Fehlerwahrscheinlichkeit mit der Fehlerrate der Montagelinie mit geringem Übungsgrad wurde

zeigt, dass die Prognosemethode die in der Realität tatsächlich aufgetretenen Fehlerraten widerspiegelt.

Die tatsächlichen Fehlerraten der Stationen wurden anhand des Verhältnisses aus absoluter Anzahl der aufgetretenen Fehler und der produzierten Stückzahl berechnet. Für die betrachteten Stationen liegen die in einem Zeitraum produzierten Stückzahlen vor. Durch die 100%-Prüfung im Anschluss an die untersuchten sechs Stationen wird jede gefertigte Einheit auf Fehler überprüft. Die Anzahl der entdeckten Fehler wird aufgezeichnet. Es kann somit anhand der vorliegenden Stückzahlen und tatsächlich aufgetretenen Fehlern die tatsächliche Fehlerrate der Linie, bestehend aus den sechs Stationen, als Außenkriterium zur Validierung der MTQM-Methode bestimmt werden. Allerdings ist diese tatsächliche Fehlerrate nur ein Durchschnitt über die sechs betrachteten Stationen. An den einzelnen Stationen kann die Fehlerrate abweichen. Die in der Validierung ermittelte Abweichung im Mittelwert beträgt 23 % und entspricht 167 ppm (parts per million).

Die Prognose der Fehlerwahrscheinlichkeit mittels der MTQM-Methode ermöglicht neben der Prognose statischer Fehlerraten auch eine Prognose dynamischer Fehlerwahrscheinlichkeiten, die Lernkurveneffekte berücksichtigen. Lernkurveneffekte tragen zur Reduzierung der Fehlerwahrscheinlichkeit aufgrund eines höheren Übungsgrads bei. Dabei konnte im Rahmen der Methodenentwicklung ein Sättigungswert von 38 % der Ausgangswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Durch die Anwendung dieses Sättigungswerts auf die prognostizierte Fehlerwahrscheinlichkeit konnte die Fehlerrate der Montagelinie mit hohem Übungsgrad bis auf eine Abweichung von 2,1 % genau bestimmt werden.

7.6 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieses Kapitels war die Vorstellung und praktische Anwendung der Montageplanungsmethode „Methods Time and Quality Measurement“ (MTQM), die das ESAT-Verfahren mit Aspekten des MTM-Verfahrens verknüpft und den Arbeitsplaner dadurch in die Lage versetzt, menschliche Fehlerwahrscheinlichkeiten in der manuellen Montage prognostizieren und alternative Planungsvarianten des Montageprozesses unter Zeit- und Risikoaspekten priorisieren zu können. Hierzu erfolgte aufbauend auf der Darlegung der theoretischen Grundlagen eine Anwendung der entwickelten Methode auf sechs manuelle Montagestationen in den Montagelinien eines Getriebeherstellers.

Durch die Methodenanwendung konnten menschliche Fehlbehandlungswahrscheinlichkeiten im Montageprozess treffsicher vorhergesagt werden.

Somit bietet die entwickelte Methode das Potenzial, proaktiv, also bereits vor Produktionsstart, besonders fehleranfällige Arbeitsschritte zu identifizieren und frühzeitig geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Um die für die Risikoquantifizierung benötigten Eingangsgrößen (Zeitwerte, montagespezifische Vorgewichte) automatisiert ermitteln zu können, wird am Fachgebiet Qualitäts- und Prozessmanagement der Universität Kassel gegenwärtig ein MS-Excel®-basiertes MTQM-Softwaretool entwickelt, dessen Aufbau in Abbildung 7.6 schematisch dargestellt ist.

Durch das Abbilden der MTQM-Methode inklusive des benötigten Methodenwissens in einem MS-Excel®-basierten Softwaretool können die Risikoanalysen zur Bewertung des menschlichen Fehlverhaltens in der manuellen Montage automatisiert durchgeführt und damit auch in Unternehmen mit eingeschränktem Methodenwissen, begrenzten finanziellen Mitteln und geringer Personaldecke eingesetzt werden. In der Software hinterlegte Analysebausteine ermöglichen es hierbei, neben kompletten Arbeitsaufgaben auch einzelne Prozessschritte einer manuellen Arbeitsaufgabe aufwandsarm unter Zeit- und Risikoaspekten zu bewerten. Somit können die Anwender kritische Prozessschritte schon bei der Planung manueller Montagetätigkeiten aufwandsarm identifizieren, alternative Lösungskonzepte erarbeiten und schließlich den unter Zeit- und Risikoaspekten optimalen Montageprozess im betrieblichen Umfeld realisieren.

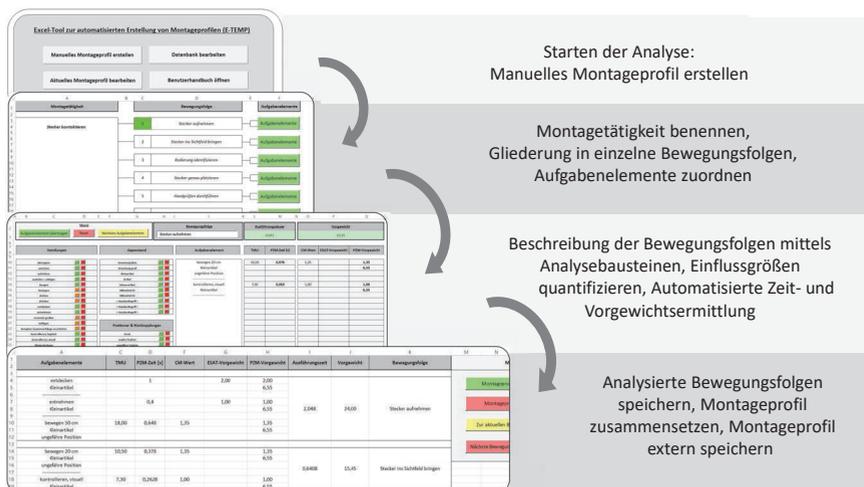


Abbildung 7.6 Einblick in das MTQM-Softwaretool

Literatur

- Bokranz, R. & Landau, K. (2012).** *Handbuch Industrial Engineering – Produktivitätsmanagement mit MTM*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Brauser, K. (1990).** *Aufgabentaxonomie: Ein Verfahren zur Ermittlung der menschlichen Leistung bei der Durchführung von Aufgaben (Band I/II)*. Ottonbrunn: Messerschmidt-Bölkow-Blohm GmbH.
- Brauser, K. (1992).** ESAT-Expertensystem für Aufgaben-Taxonomie. In: H. Bubb (Hrsg.), *Menschliche Zuverlässigkeit*. Landsberg: ecomed.
- Brecher, C. & Schapp, L. (2009).** *Strategien und Trends in der Montagetechnik*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag.
- Britzke, B. (2013).** *MTM in einer globalisierten Wirtschaft: Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren*. München: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag.
- Chaffin, D.B. & Hancock, W.M. (1966).** Factors in manual skill training. In: MTM-Report, The University of Michigan, Ann Harbor (Michigan).
- David, H. A. (1988).** *The method of Paired Comparisons*. New York: Oxford University Press.
- DeGreiff, M. (2001).** *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Duffey, R. B. & Saull, J. W. (2008).** *Managing Risk – The Human Element*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Embrey, D. E. (1983).** *The use of performance shaping factors and quantified expert judgement in the evaluation of human reliability. An initial appraisal (NUREG/CR-2986)*. Washington: NRC.
- Hacker, W. (2005).** *Allgemeine Arbeitspsychologie*. Bern: Hans Huber Verlag.
- Kiesel, A. & Koch, I. (2012).** *Lernen – Grundlagen der Lernpsychologie*. Wiesbaden: VS Verlag, Springer Fachmedien.
- Merkel, T. & Winkler, S. (2010).** Prognose der Einarbeitungsdauer. In: B. Britzke (Hrsg.), *MTM in einer globalen Wirtschaft*. München: FinanzBuch Verlag.
- Refflinghaus, R. & Kern, C. (2012).** Interdisziplinärer Ansatz zur Vorhersage und Reduzierung menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeiten in der manuellen Montage. In: R. Woll & M. Uhlemann, *Vielfalt Qualität – Tendenzen im Qualitätsmanagement*. Aachen: Shaker Verlag.

Refflinghaus, R. & Kern, C. (2013, April). *Prognose der menschlichen Zuverlässigkeit bei der Ausführung von manuellen Montagetätigkeiten*. Tagungsband der 26. Fachtagung Technische Zuverlässigkeit – Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, Leonberg.

Refflinghaus R. & Kern, C. (2014). Prospektive Ermittlung und Reduzierung potentieller Fehler für manuelle Montagelinien. In: S. Gröger, T. Eiselt & J. Schuldt (Hrsg.), *Qualitätsmanagement denken – motivieren – leben*. Aachen: Shaker Verlag.

Refflinghaus, R. & Kern, C. (2015, August/September). *Expert System for evaluating human reliability in manual assembly operations. Proceedings of the 18th International Conference on Quality and Service Science (Toulon-Verona Conference)*, Palermo (Italy).

Schloske, A. & Henke, J. (2006). Was kosten Fehler am Band? *Qualität und Zuverlässigkeit*, 4, 41–44.

Sträter, O. (1997). *Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit auf der Basis von Betriebserfahrung (GRS-138)*. Köln: GRS.

Swain, A. D. & Guttman, H. E. (1983). *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications – Final report*. Washington, D.C.: US Nuclear Regulatory Commission.

Tietjen, T. & Müller D. (2011). *FMEA-Praxis*. München/Wien: Verlag Hanser.

VDI 4006 Blatt 1 (2015). *Menschliche Zuverlässigkeit: Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit*. Berlin: Beuth Verlag.

Work-Factor-Council (2015). Verfügbar unter <http://www.work-factor.nl.nu>.