

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

JÜRGEN HENKE

Eine Methodik zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage komplexer Systeme



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Jürgen Henke

**Eine Methodik zur Steigerung der
Wertschöpfung in der manuellen Montage
komplexer Systeme**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © artstudio pro - Fotolia

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-0964-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2015

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Eine Methodik zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage komplexer Systeme

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jürgen Henke
aus Esslingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h. c.
mult. Engelbert Westkämper

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Januar 2015

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
der Universität Stuttgart

2015

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Mein erster Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Engelbert Westkämper für die Betreuung und großzügige Unterstützung meiner Ideen.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Meinen Kollegen möchte ich für die vielen wertvollen Anregungen, Diskussionen und Aufmunterungen danken. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing Alexander Schloske für die zahlreichen Hinweise und Herrn Dipl.-Wirt.-Ing.(FH) Oliver Schwandner MBA für die fruchtbaren Gespräche.

Die Umsetzung der neuen Methodik wurde möglich durch den Mut von Herrn Dipl.-Ing. Dieter Asböck, neue Wege in der Montageplanung zu gehen. Ohne die zahlreichen Hinweise und Kommentare von Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Ast hätte das entwickelte Werkzeug zur Unterstützung der neuen Methode niemals den heutigen Stand erreicht.

Die Werkzeuge sind Dank der Unterstützung durch die studentischen Hilfskräfte Sebastian Schmieschek und Andre Colomb (Versionen 1-3) und Elena Maier und Ina Klamt (Excel) auf einem hohen Nutzen-Level angekommen.

Zuletzt gilt mein tiefer Dank meiner Ehefrau Jutta und meinen Söhnen für Ihr Verständnis und Ihre Unterstützung.

Esslingen, 2015

Kurzfassung

Moderne technische Produkte werden immer komplexer und individueller. Die steigende Komplexität ist den steigenden Anforderungen an die Produkte geschuldet, sei es aus funktionalen Gründen oder aus regulatorischen Gründen. Die Montage – und die Montageplanung – muss mit diesen steigenden Anforderungen umgehen, d.h. die optimale Montage muss die Qualitätsziele („Zero Defects“) mit den Zeit- und Kostenvorgaben vereinen. Das Problem für den Montageplaner sind dabei die vom Menschen verursachten Fehler, die stochastischen Charakter haben und durch die üblichen Planungswerkzeuge nur schwer fassbar sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Methode vorgestellt, die es erlaubt, Fehlerkosten zu ermitteln und den Konformitätskosten direkt gegenüberzustellen. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Erfahrungswissen der Montagemitarbeiter, das zum einen unterstützt, eine Bewertung der Fehlerwahrscheinlichkeiten vorzunehmen, zum anderen Aussagen zu den direkten Fehlerfolgen wie Umfang der Nacharbeit und des Ausschuss ermöglicht.

Zur Unterstützung der Methode und zur Validierung werden informationstechnische Werkzeuge eingesetzt, die einerseits verdichtete Analysen in Pareto-Form ermöglichen, andererseits den Abgleich mit dokumentierten (realen) Fehlerzahlen zulassen.

Short Summary

Modern technical products are becoming more complex and – in the same context – more individual. The increasing complexity is due to the increasing demands on the products, whether for functional reasons or for regulatory reasons. The assembly – and the assembly planning – must deal with these increasing demands, ie the optimal assembly must fulfill the quality objectives ("Zero Defects") as well as the time and cost requirements. The main issues of assembly planning are the human errors. These are of stochastic nature and are not easily considered by the current planning tools.

In this work a new method is presented, which allows calculating failure costs of an assembly process and compare compliance costs directly. The worker experience is vitally important, because he knows about these stochastic failures, in particular failure probabilities, necessary rework and amount of scrapped materials.

Information technology tools are used to support the new method and to validate the analyzed data. These tools allow for ABC- / Pareto-analyses of the failure costs and help in comparing real (documented) failure counts with the numbers from the new method.

Inhalt

Inhalt	7
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungsverzeichnis.....	14
1 Einleitung.....	15
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	18
1.2 Zielsetzung und Aufgabe	20
1.3 Vorgehensweise	22
2 Planung und Optimierung von Montageprozessen.....	23
2.1 Eigenarten des Montageprozesses.....	23
2.2 Planung von Montageprozessen.....	24
2.2.1 Optimierung des Montageprozesses nach der Zeit	26
2.2.2 Optimierung des Montageprozesses nach der Qualität.....	32
2.2.3 Optimierung des Montageprozesses nach den Kosten	45
2.3 Ansätze zur Vereinigung von Qualität und Kosten	52
2.3.1 Integration von Kostenaspekten in die FMEA.....	52
2.3.2 Integration von Abweichungskosten in die Prozesskostenrechnung	54
2.4 Defizite der bekannten Prozessplanungsmethoden im Hinblick auf eine gesamtheitliche Optimierung.....	55
2.4.1 Methoden zur Zeitoptimierung	55
2.4.2 Methoden zur Qualitätsoptimierung.....	55
2.4.3 Methoden zur Kostenoptimierung	56
2.4.4 Zusammenfassung der Defizite.....	58
3 Konkretisierung der Aufgabenstellung	61
4 Entwicklung einer Methode zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage.....	63
4.1 Die Grundlagen der Methode	63
4.2 Die Elemente der neuen Methode.....	66
4.2.1 Darstellung des Prozessablaufes	66
4.2.2 Erfassung von Konformitätskosten	67

4.2.3	Zuordnung der Fehler zu den Prozessschritten	67
4.2.4	Bewertung der möglichen Fehler	69
4.2.5	Kombination von Fehlerentstehung und Fehlerentdeckung.....	73
4.2.6	Modell zur Erfassung von Abweichungskosten	74
4.2.7	Zuordnung von Abweichungskosten.....	75
4.2.8	Prüfmaßnahmen	78
4.2.9	Bewertung von Prüfinvestitionen.....	78
4.2.10	Darstellung der Analyseergebnisse	79
4.2.11	Abgleich mit Kundenprüfungen.....	80
4.2.12	Fehlerfluss	81
4.2.13	Berücksichtigung von Mehrfach-Auftreten oder Mehrfach-Entdeckung	82
4.2.14	Kennzahlen	82
4.2.15	Anpassung des Bewertungskataloges an die Jahresproduktion	83
4.2.16	Vermeidungsmaßnahmen.....	85
4.3	Informationstechnische Umsetzung der Methode	86
4.3.1	Prozessablauf	86
4.3.2	Zuordnung Fehler zu Prozessschritt	87
4.3.3	Fehlerzahlen.....	88
4.3.4	Fehlerkosten.....	94
4.3.5	Auswertungen	95
4.3.6	Maßnahmindarstellung.....	97
4.4	Erweiterung der informationstechnischen Umsetzung zur Web- Applikation	99
4.4.1	Zugriff über das World-Wide-Web.....	102
4.4.2	Sicherstellen der Datenverfügbarkeit	104
4.4.3	Verteilte Bearbeitung der FPM-Daten.....	105
4.4.4	Maßnahmenmanagement	106
5	Bewertung und Validierung der neuen Methodik.....	108
5.1	Unsicherheit der neuen Methodik durch die Nutzung von Erfahrungswerten.....	108
5.2	Validierung der neuen Methodik	110
5.2.1	Vor-Pilotanwendung Dieselmotoren-Montageband.....	110
5.2.2	Vergleich von FPM- und FEDOK-Daten	113
5.2.3	Vergleich des FPM-Prozess mit dem FMEA-Prozess	116
5.2.4	Vergleich der Ergebnisse der FPM mit den Ergebnissen der FMEA.....	118
5.2.5	Ergebnis der Validierung.....	122
5.3	Abgleich mit den geforderten Zielen.....	122

6	Zusammenfassung.....	124
7	Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen	127
7.1	Betrachtungen zur statistischen Zuverlässigkeit der Bewertungssystematik der Auftretenswahrscheinlichkeit	127
7.2	Erweiterung der FPM	127
7.3	Simulation.....	128
7.4	Übertragung des FPM-Prinzips auf weitere Anwendungsfelder	129
8	Literaturverzeichnis.....	130
A	Anhang	140
A.1	Aufbau der FPM-Datenbank.....	140
A.2	Checkliste FPM.....	141
A.3	Weitere FPM-Werkzeuge.....	142
A.4	Integration der Methodik in ein CAQ-System	144

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Abbildungen des Verfassers.

Abbildung 1	"Magisches Dreieck"	16
Abbildung 2	Der moderne Ansatz der Qualitätskostenoptimierung (Graf 1998)	17
Abbildung 3	spezifische Opportunitätskosten je Fehlerereignis	18
Abbildung 4	ideale versus reale Anlaufkurve	20
Abbildung 5	QM-Methoden im Vorfeld der Produktion (Pfeifer 2002)	33
Abbildung 6	Zusammenhang Produkt- und Prozess-FMEA (Schloske 2010)	36
Abbildung 7	Fehlerkosten im Produktlebenslauf (Pfeifer 1996)	38
Abbildung 8	Ablauf der FMEA (VDA-QMC)	39
Abbildung 9	System und Systemstruktur nach VDA	40
Abbildung 10	FMEA-Struktur mit Funktionen und Fehlfunktionen	41
Abbildung 11	Vorschlag eines Bewertungskatalogs für eine Prozess-FMEA nach VDA	42
Abbildung 12	Priorisierung nach Faktoren A, B und E nach (Schloske 2009)	43
Abbildung 13	(Teil-)Fehlernetz einer FMEA-Analyse	44
Abbildung 14	Problem der Stichprobenprüfung für stochastisch auftretende Fehler (Schloske 2010)	45
Abbildung 15	Kombination der Fehlertripel (Haffner 2005)	53
Abbildung 16	Fehlerkosten in der Fertigung (Schmidt 1996)	54
Abbildung 17	OEE (Steinhardt 2006)	57
Abbildung 18	Erfüllung der Anforderungen durch existierende Methoden	60
Abbildung 19	Zielvorgabe für die neue Methode	62
Abbildung 20	Darstellung des Prozessablaufs	66
Abbildung 21	Zuordnung der Konformitätskosten	67
Abbildung 22	Zuordnung der Fehler zu den Prozessschritten	68
Abbildung 23	Unterschiede der FMEA- und der FPM-Kataloge (Auftreten Fehler)	70
Abbildung 24	Unterschiede der Bewertungskataloge für die Fehlerentdeckung	72
Abbildung 25	Fehlerauftritt und Fehlerentdeckung als Zeitstrahl	73
Abbildung 26	Darstellung des Wertschöpfungsverlustes im Fehlerfall	74

Abbildung 27	Zuordnung von Abweichungskosten	76
Abbildung 28	Handhabung von "Facelifts"	78
Abbildung 29	ABC-Diagramm der Nacharbeitskosten.....	79
Abbildung 30	Abgleich von durchlaufenden Fehlern mit dem Kunden.....	80
Abbildung 31	Darstellung des Fehler-auf- und -abbau über den Prozess.....	81
Abbildung 32	Änderungen im Fehlerfluss bei multiplen Entstehungs- und Entdeckungsorten	82
Abbildung 33	Fehlerwahrscheinlichkeiten bei geänderten Produktionszahlen.....	83
Abbildung 34	Darstellung des Prozessablaufs in der Tabellenkalkulation.....	86
Abbildung 35	Darstellung der Matrix in der Tabellenkalkulation	87
Abbildung 36	Darstellung der Fehlerzahlen	89
Abbildung 37	AxE-Matrix (Henke 2012)	90
Abbildung 38	Berechnungsbeispiel A x E	91
Abbildung 39	Programmablaufplan des FPM-Makros	92
Abbildung 40	Bewertung der Nacharbeitsaufwände	94
Abbildung 41	Berichtsblatt im FPM-Tool.....	96
Abbildung 42	Diagramm der Nacharbeits-Schwerpunkte	97
Abbildung 43	Maßnahmenliste	98
Abbildung 44	verdichtete Maßnahmendarstellung	99
Abbildung 45	Entity-Relationship-Diagramm der FPM-Datenbank	101
Abbildung 46	Zwei-Faktor-Authentifizierung der FPM-Datenbank nach (Bader 2012)	102
Abbildung 47	Architektur FPM-Webservice (Bader 2012)	103
Abbildung 48	Überblick WebFPM	104
Abbildung 49	Darstellung der Prozessschritte	105
Abbildung 50	Bearbeitung der Daten des Prozessschrittes.....	106
Abbildung 51	Maßnahmenübersicht im Webbrowser.....	107
Abbildung 52	Maßnahmenbearbeitung im Webbrowser	107
Abbildung 53	mögliche Abweichungen der prognostizierten Fehlerzahlen	109
Abbildung 54	potentielle Abweichungen der Fehlerzahlen für niedrige Bewertungsstufen	110

Abbildung 55	Fertigungsbereiche der Montagelinie (Albrecht 2005)	111
Abbildung 56	Darstellung der Entdeckungsdistanz im Layout.....	112
Abbildung 57	Attribute der FEDOK-Datenbank	113
Abbildung 58	Vergleich FPM- und FEDOK-Daten.....	116
Abbildung 59	Prozessstrukturierung FMEA – FPM (Hagmayer 2006).....	117
Abbildung 60	Arbeitsschritte und Funktionen in der Vergleichs-FMEA	119
Abbildung 61	Fehlernetz der Vergleichs-FMEA für "Prozessstörung"	120
Abbildung 62	Pareto-Diagramm der Montagefehler i.d. FMEA.....	120
Abbildung 63	RPZ-Priorisierung der FMEA	121
Abbildung 64	Realisierung des Datenmodells	140
Abbildung 65	Checkliste (Le 2012).....	141
Abbildung 66	Erfassungsfenster der readExcel V3.....	142
Abbildung 67	Bewertungskatalog bei readExcel V3	143
Abbildung 68	Pflege der FPM-Daten mittels PDA	143
Abbildung 69	FPM-Modul im CAQ-System (IBS 2012)	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Kennzahlen für die Methodenbewertung.....	58
Tabelle 2	Bewertungskatalog der Kennzahlen.....	58
Tabelle 3	Ergebnisse der Methodenbetrachtung	58
Tabelle 4	Bewertungskatalog für den Fehlerauftritt	69
Tabelle 5	Bewertungskatalog für die Fehlerentdeckung.....	71
Tabelle 6	Katalog zur Bewertung der Fehlerfolgen	77
Tabelle 7	mögliche Bewertungsstufen für den Fehlerauftritt	84
Tabelle 8	Bewertungskatalog für den Fehlerauftritt bei kleinen Jahresproduktionszahlen	85
Tabelle 9	mögliche Schätzfehler	108
Tabelle 10	Fehlerklassen zur Analyse von Fehleraufzeichnungen.....	115

Abkürzungsverzeichnis

CAQ	Computer-Aided-Quality
DNC	Distributed Numeric Control
ER	Entity-Relationship
FEDOK	Fehlerdokumentation
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse
FPM	Fehler-Prozess-Matrix
FTA	Fehlerbaumanalyse
HDP	Hochdruckpumpe
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KPI	Key Performance Indicator
MOST	motion time system
MTM	methods-time measurement
MTM-UAS	MTM Universelles Analysiersystem
ODBC	Open Database Connectivity
OEE	Overall Equipment Efficiency
PAP	Programmablaufplan
PKR	Prozesskostenrechnung
RFT	right-first-time
RPZ	Risikoprioritätszahl
TC	Target Costing
VBA	Visual Basic for Applications
VDA	Verband der deutschen Automobilindustrie
VDA-QMC	VDA-Quality Management Center
WA	Wertanalyse
WFA	Work-Factor-Analyse

1 Einleitung

Moderne technische Produkte zeichnen sich durch zwei wesentliche Eigenschaften, die für diese Arbeit von Bedeutung sind, aus: sie werden zum einen immer komplexer und zum anderen immer individueller. Die steigende Komplexität ist den steigenden Anforderungen an die Produkte geschuldet, sei es aus funktionalen Gründen oder aus regulatorischen Gründen. Dies können z.B. Regeln zur Reduzierung von Gefährdungen des Menschen oder der Umwelt sein. Der Begriff „komplex“ kann nach der Definition des Dudenverlags im Sinne von „vielschichtig; viele verschiedene Dinge umfassend“ und „zusammengesetzt; nicht allein für sich auftretend, ineinandergreifend“ (Duden) genutzt werden. In der Sprachforschung wird ein komplexes System als ein Gebilde definiert, "dessen Gesamtverhalten man selbst dann nicht eindeutig beschreiben kann, wenn man vollständige Informationen über seine Einzelkomponenten und ihre Wechselwirkungen besitzt" (Härtl 2008). Diese Definition deutet schon darauf hin, dass viele industrielle Produkte als komplex gelten müssen, da ihr Aufbau aus vielen Einzelteilen, die oft auch noch getrennt voneinander von unterschiedlichen Unternehmen gefertigt werden, die genannte Bedingung erfüllt.

Aufgabe der Montage ist es nun, aus den verschiedenen, in der Fertigung produzierten Einzelteilen, ein System höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen zusammenzubauen, was in einem vordefinierten Zeitraum erfolgen muss (Westkämper 2001b, S.4), (Warnecke et al. 1975, S.11). Nach den geltenden Richtlinien wird die Montage mit den Grundfunktionen des Fügens (DIN 8593) und den weiteren Tätigkeitsfeldern wie dem Zubringen, Kontrollieren, Justieren und den Hilfsfunktionen (VDI 2860), zu denen auch Materialtransporte zwischen den Bearbeitungsstationen zählen, beschrieben. Das Zusammenwirken entsprechend vieler Einflussgrößen bei komplexen Produkten macht das

Finden des Optimums des „magischen Dreiecks“ mit den Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Die einzelnen Optimierungsziele wie die optimale Auslastung einer Montagelinie, die Produktion ohne Fehler oder die rentabelste Montage sind auf vielen

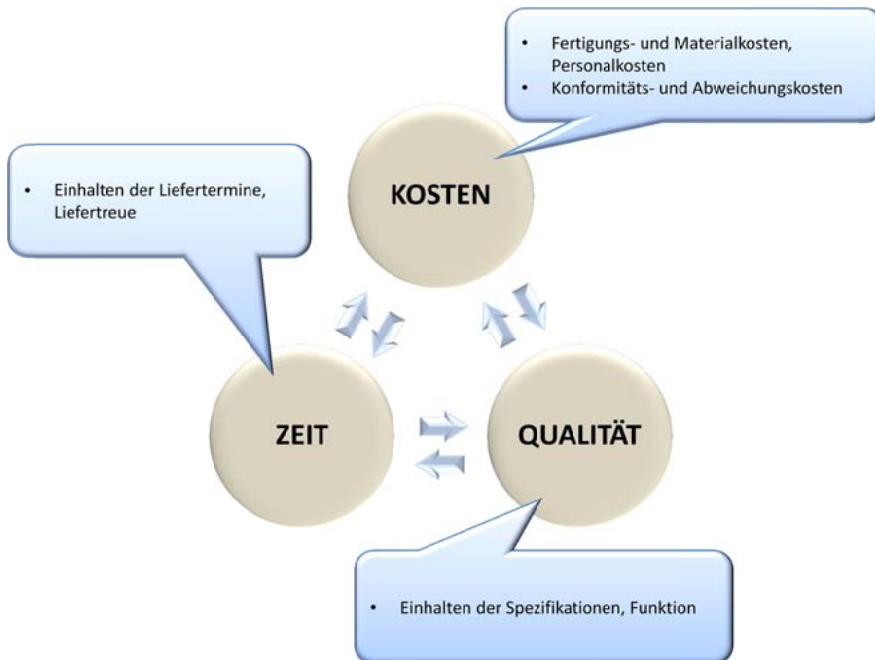


Abbildung 1 "Magisches Dreieck"

Wegen schon erreicht worden – zu jedem der genannten Ziele wurden zahlreiche Methoden entwickelt, beschrieben und erprobt. Einige dieser Methoden haben einen Status als Industriestandard oder zu mindestens anerkanntem Stand der Technik erreicht. Für die Planung der einzelnen Arbeitsschritte mit dem Ziel einer optimalen Austaktung ist dies z.B. die Vorgehensweise nach MTM (siehe dazu Kapitel 2.2) oder zur Beseitigung aller systematischen Verschwendungspotentiale das Wertstromdesign. (Warnecke et al. 1975), (Westkämper 2001b), (Wiendahl 2008), (Werdich et al. 2011), (Lotter et al. 1994), (Eversheim 2002), (Juran et al. 1999), (Eversheim 1997), (Bullinger et al. 1986), (Konold et al. 2009), (Tietjen et al. 2003).

Die Frage nach dem Optimum des „magischen Dreiecks“ wurde durch diese Methoden noch nicht beantwortet. Durch die intrinsischen Widersprüche der Ziele Zeit, Kosten und Qualität ist es offensichtlich, dass das Gesamtoptimum nicht aus deren lokalen Optima gebildet werden kann, wie schon in (Warnecke et al. 1975, S.103–104) gezeigt wurde. Als Beispiel sei hier die „Null-Fehler-Strategie“ erwähnt, die, je näher man der gewünschten 100%-Qualität-Linie kommt, in der Realität exponentiell steigende Konformitätskosten verursacht (Graf 1998). Dies ist im Wesentlichen der Tatsache geschuldet, dass bei Montagelinien mit manuellen Anteilen ein wesentlicher Teil der Fehler stochastisch auftritt, wie z.B. „vergessen“ oder „vertauscht“. Die Ursache dieser Fehler liegt in der menschlichen Natur begründet, wie die Ergebnisse zur Untersuchung der menschlichen Fehler in (Kern et al. 2011) oder in (Becker et al. 2006) zeigen. Diese zufällig auftretenden Fehler können nur mit 100%-Prüfungen zuverlässig entdeckt werden.

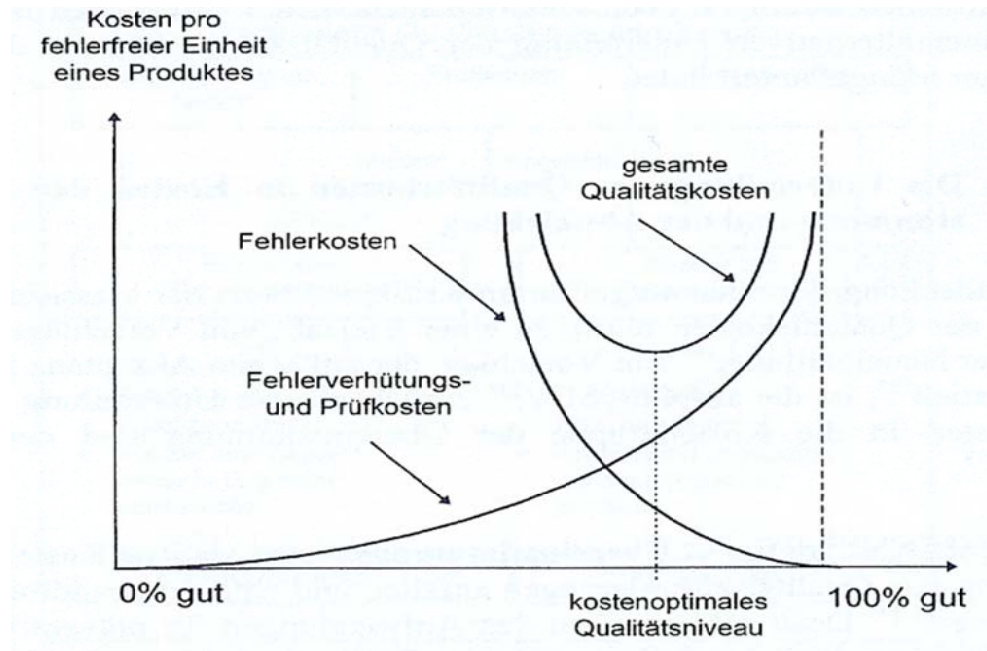


Abbildung 2 Der moderne Ansatz der Qualitätskostenoptimierung (Graf 1998)

In Abbildung 2 ist qualitativ der Zusammenhang zwischen den Abweichungs- und Opportunitätskosten dargestellt, das „kostenoptimale

Qualitätsniveau“ ist leider so nur ex post nachweisbar und wird auch in (Bruhn 1997) links der Null-Fehler-Linie („100% gut“) vermutet.

In Abbildung 3 wird gezeigt – anhand einer Auswertung realer Fehlerdaten einer Montagelinie – wie bei angenommenen fixen Kosten für die Maßnahmen zur Fehlerbehebung die spezifischen Opportunitätskosten bei abnehmender Anzahl an Fehlerereignissen ansteigen.

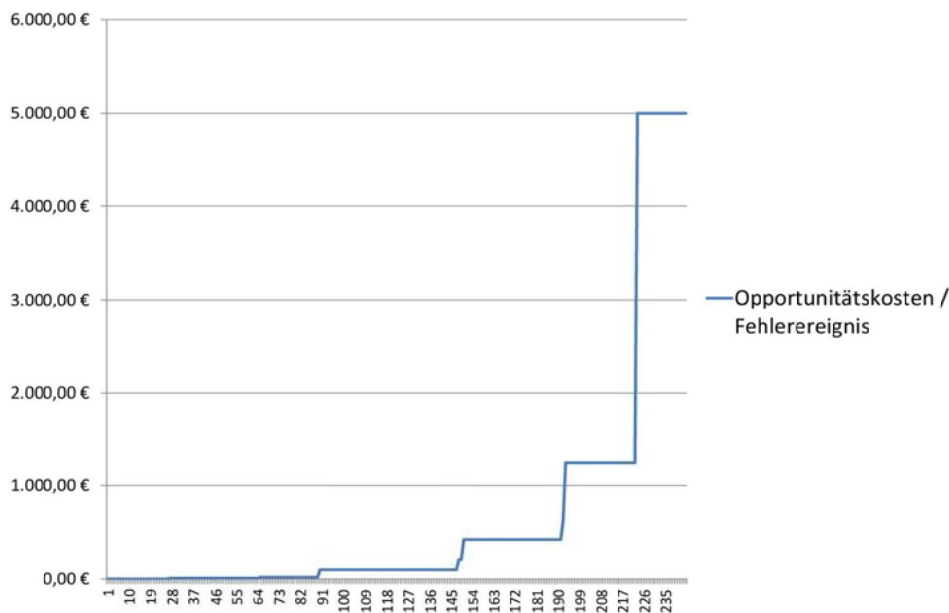


Abbildung 3 spezifische Opportunitätskosten je Fehlerereignis

Erschwerend kommt hinzu, dass – speziell im Bereich der manuellen Montage – die Fehlerfunktionen nicht linear verlaufen, sondern bei zunehmender Belastung des Werkers wieder exponentiell ansteigen. Darauf weisen die Ergebnisse der Arbeiten zum Thema „Menschliche Fehlerraten“ (Nada et al. 2006) hin. Sie zeigen den starken Anstieg der stochastischen Fehler bei der Annäherung an die Austaktungsgrenze und damit die Belastungsgrenze des Menschen auf.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die – unter anderem im Rahmen der Forderung nach „individuellen Produkten“ – notwendig werdende Flexibilisierung der Montage und die

immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen führen dazu, dass, aufgrund der steigenden Anzahl der Varianten und den typischerweise kleineren Stückzahlen einer Variante, die klassische Risikoanalyse zu zeitaufwendig wird (Lesmeister 2001, S.21–22; Schuh et al. 2008, S.670). Die Notwendigkeit der Beschleunigung der Planungsphasen wird zum Beispiel schon in (Westkämper 2001) genannt. Darüber hinaus werden bei der klassischen Risikoanalyse Kostenaspekte nur nachrangig betrachtet. Sie genügt sich im Nachweis der Vermeidung von Fehlerkosten, ohne dabei systematisch diese Reduktion der Fehlerkosten mit den dazu notwendigen Konformitätskosten in Beziehung zu setzen (Goebbels et al. 2004, S.5). Trotz der durch die Anwendung präventiver Methoden möglichen Kosteneinsparungen wenden Unternehmen diese selten an. Diverse Untersuchungen – (Theden 2002), (Spath et al. 2001), (Pfeifer et al. 2002) – zur Anwendung präventiver Methoden zeigen, dass 75% der Unternehmen diese Methoden kennen, aber nur 20% diese anwenden. Als Hauptgründe für die Nicht-Anwendung werden die Komplexität der Methoden und der Mangel an Funktionalität genannt.

Nicht zuletzt deshalb konzentriert sich die Planung vor Serienanlauf auf die bessere Auslastung von Montagelinien – dabei geht der Trend dazu, wegen der genannten Gründe (mehr Varianten aufgrund der zunehmenden Individualisierung, kürzere Lebenszyklen) weniger Automatisierungslösungen einzusetzen und mehr manuelle Tätigkeiten vorzusehen: *„Die Analyse zeigt, dass bei volatilen Marktbedingungen manuelle Montagesysteme bei entsprechender Gestaltung gegenüber konventionellen (automatisierten) Konzepten wirtschaftliche Vorteile aufweisen.“* (Spengler et al. 2005)

Als Resultat dieser Entwicklungen zeigt sich, dass durch die schwierige Planungsaufgabe von Montageprozessen, unter anderem durch die geforderte große Variabilität, kaum das angemessene Maß an präventiver

Absicherung stattfindet und zudem wenig Überblick über die Kostensituation vorhanden ist (Schloske 2009).

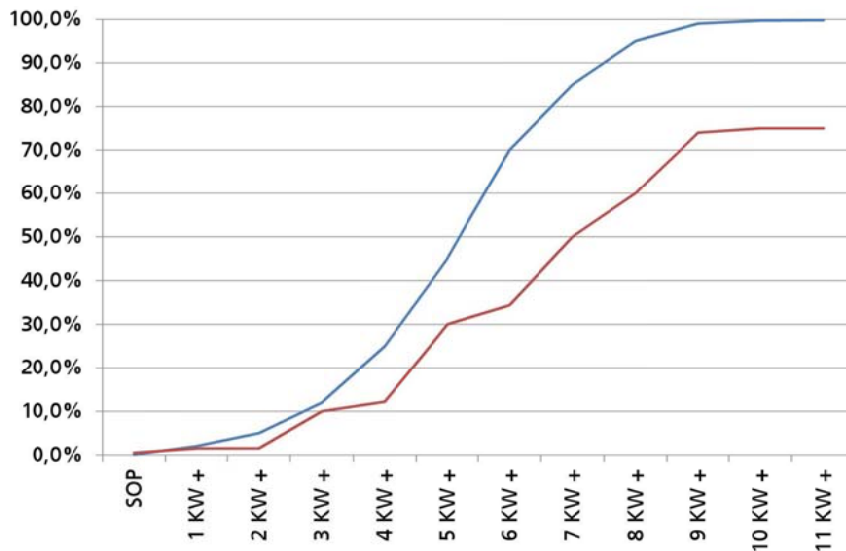


Abbildung 4 ideale versus reale Anlaufkurve

Schuh zitiert in (Schuh G. et al. 2005, S.406) eine Studie zum Thema Produktionsanlauf in der europäischen Automobilindustrie mit folgenden Ergebnissen: *„47% der Fahrzeuganläufe waren weder wirtschaftlich noch technisch erfolgreich. Weitere 20% waren zwar technisch, nicht aber wirtschaftlich erfolgreich. Lediglich ein Drittel aller untersuchten Produktionsanläufe waren sowohl wirtschaftlich als auch technisch erfolgreich.“*

Die beschriebenen Defizite manifestieren sich in den bekannten und charakteristischen Anlaufproblemen von neu geplanten Montagelinien, die ihre Ursache oft in einseitig optimierten Prozessen während der Planungsphase haben, wodurch zu einem späten Zeitpunkt noch Korrekturen an den Prozessen notwendig sind.

1.2 Zielsetzung und Aufgabe

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist eine Methode zu entwickeln, die die oben genannten Nachteile bezüglich der einseitigen Optimierungsrichtung

überwindet indem Qualität, Zeit und Kosten in Zusammenhang gebracht und gemeinsam optimiert werden und die mit möglichst geringem Aufwand zu einer signifikanten Erhöhung der Wertschöpfung beiträgt. Die ganzheitliche Optimierung einer Montagelinie, also die gleichzeitige Optimierung der Aufwände (Investitionen, proportionale Kosten, Fixkosten) und der Qualitätsziele (Fehlerkosten) soll durch Gegenüberstellung der Konformitätskosten und der Abweichungskosten erreicht werden. So soll das in Abbildung 2 gezeigte, „kostenoptimale Qualitätsniveau“ zu erreicht oder zu mindestens angenähert werden. Als Kernaufgaben müssen dazu die Fragen

- Welche Prozess-Risiken existieren und zu welchen Abweichungskosten führen diese?
- Wer hat das Prozesswissen zur Bewertung dieser Prozess-Risiken?
- Wie können die Abweichungskosten vorhergesagt werden?
- Wie können die Konformitätskosten den Abweichungskosten gegenübergestellt werden?
- Wie kann die Verhältnismäßigkeit der Konformitätskosten bestimmt werden?

beantwortet werden.

Ein besonderer Augenmerk soll auf die Vermeidung von durchlaufenden Fehlern ins Feld gelegt werden, denn diese Fehler führen zu den Gewährleistungskosten, die mit Abstand den größten Anteil an den Fehlerkosten haben („rule-of-ten“, siehe dazu unter Anderem (Wittig 1994) oder (Pfeifer 1996)). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die ausführenden Mitarbeiter die zu entwickelnde Methode akzeptieren, d.h. sie muss leicht verständlich und anwendbar sein und klar erkennbaren Nutzen aufweisen.

1.3 Vorgehensweise

Die gestellte Aufgabe erfordert folgende Vorgehensweise:

In einem ersten Schritt werden typische Eigenschaften des Montageprozesses analysiert und die daraus resultierenden Eigenheiten bei der Planung von Montageprozessen beschrieben. In einem zweiten Schritt werden nach Relevanz ausgewählte, charakteristische Methoden, die dem Stand der Technik entsprechen, dargestellt und analysiert. Die Analyse wird kurz die Vorgehensweisen der jeweiligen Methode mit ihren Anforderungen, Vor- und Nachteilen und zu erwartenden Ergebnissen betrachten. Die Ergebnisse dieser Analyse sollen in einem dritten Schritt der Problemstellung gegenübergestellt und die zu erwartende Zielerreichung ermittelt werden. In einem vierten Schritt soll – durch Eliminierung von nicht benötigten Elementen und Synthese brauchbarer Elementen der untersuchten Methoden und Hinzufügen von eigenen Elementen – eine Methode entwickelt werden, die die Voraussetzungen bietet, um die gesteckten Ziele zu erreichen. In einem letzten Schritt soll die neue Methode validiert und, soweit möglich, verifiziert werden.

2 Planung und Optimierung von Montageprozessen

2.1 Eigenarten des Montageprozesses

Durch die – im Vergleich mit anderen Fertigungsprozessen einfach beherrschbaren Abläufe und den damit verbundenen geringeren technologischen Risiken – ergibt sich auch ein stark reduzierter Katalog von denkbaren Fehlerursachen. Gleichzeitig steigt durch den größeren Anteil manueller Tätigkeiten das Risiko, dass menschliche Fehlleistungen entstehen. Diese manifestieren sich als ein begrenzter Satz von Fehlern wie „vergessen“, „vertauscht“, „falsch gefügt“.

Eine weitere typische Eigenart von Montageprozessen ist, dass der einzelne Arbeitsplatz bzw. die einzelne Station der Betrachtungsgegenstand für eine Risikoanalyse ist und dass die Abläufe verschiedenen Arbeitsplätze große Ähnlichkeiten aufweisen.

Die Arbeitskräfte in Montageprozessen sind in der Regel angelernte Arbeitskräfte (Feldmann et al. 2003, S.85) – dies ist möglich, weil der Montageprozess gegenüber dem klassischen Fertigungsprozess eine höhere Anzahl Einzelschritte aufweist, diese aber von einfacherer Natur sind. Die Mitarbeiter in der Montage werden in der Regel an einzelnen Arbeitsplätzen zur Durchführung einer begrenzten Anzahl von Montagevorrichtungen angelernt. Dies erfolgt typischerweise durch Vormachen in unsystematischer Form. Die wachsende Komplexität der Produkte und Systeme und die zunehmende Anzahl an Produktvarianten führen zu steigenden Anforderungen an die Beschäftigten hinsichtlich der Merkfähigkeit und der motorischen Fähigkeiten. Werden die Beschäftigten nicht auf die sich verändernde Situation vorbereitet, kommt es zu erheblichen Folgen wie hohen Fehlerquoten. (Feldmann et al. 2003, S.73)

Durch die Verkürzung der Produktlebenszyklen und die Entwicklung schnelllebiger Nischenprodukte verringern sich die Produktionslaufzeiten der Produkte. Darüber hinaus sorgt die Forderung nach der Fertigung

kundenindividueller Produkte dafür, dass die Variantenvielfalt bei gleichzeitig kürzer werdenden Produktlebenszyklen ständig ansteigt. (Loy 2010, S.1)

Die Montage dieser Produkte erfolgt deshalb, trotz hoher Lohnkosten, vorwiegend manuell (Alber et al. 1999, S.426), da automatisierte Lösungen die notwendige Flexibilität nicht gewährleisten können. (Lay et al. 2000)

Die Montage ist – nicht zuletzt durch die Position am Ende der Wertschöpfungskette – der Ort, an dem fast alle organisatorischen, terminlichen und qualitativen Fehler der vorhergehenden Schritte zu Tage treten. (Westkämper 2001b, S.3)

“The great significance of assembly in a company's success is due to its function- and quality-determining influence on the product at the end of the direct production chain. Rationalization of assembly is still technologically impeded by high product variety and the various influences resulting from the manufacturing tolerances of the parts to be joined.”

(Salvendy 2001, S.402)

2.2 Planung von Montageprozessen

Aufgrund der kürzer werdender Produktlebenszyklus- und Entwicklungszeiten müssen die Montageplaner ihren Prozess in immer kürzerer Zeit zu einem ausreichenden Reifegrad zu bringen. Für die Auswahl eines passenden Montagesystems steht nur wenig Zeit zur Verfügung. (Spath et al. 2007, S.625)

Nach (Lotter 1986, S.2–3) sind die wesentlichen Hemmnisse schneller Rationalisierungserfolge in der Montage folgende:

- Die Produktlebensdauer wird kürzer, die Losgrößen kleiner und die Variantenzahl größer.
- Die Montage ist der letzte Fertigungsabschnitt und ist laufend an die sich ändernden Anforderungen des Marktes anzupassen.

- Alle in Planung, Produktentwicklung und Vorproduktion auftretenden Fehler wirken sich in der Montage aus.
- Die Arbeitsinhalte der Montage sind sehr verschiedenartig und bedingen zur Erreichung einer großen Flexibilität eine hohe Personalbindung.
- Produktspezifische Montagetechniken und Organisationsformen, wie Einzelarbeitsplätze, Linienmontage, Baustellenmontage und automatisierte Montage, erschweren das Übertragen einmal gefundener Lösungen auf andere Produkte.
- Die Produkte sind nicht nach Montagegesichtspunkten gestaltet.

„Unter Rationalisieren eines Montageprozesses versteht man das Bemühen, den Wirkungsgrad des Prozesses durch Anwenden wissenschaftlicher Erkenntnisse und systematischer Methoden zu erhöhen. Die dabei zu ergreifenden Maßnahmen haben zum Ziel, die Montageaufgaben mit einem minimalen Aufwand an Arbeit, Zeit, Energie, Material und Kapital zu lösen.“ (Warnecke et al. 1975, S.14)

Zu den Aufgaben der Montageplanung zählen die Analyse von Produkt und Anforderungen, die Grob- und Feinplanung des Montageablaufs und die Anordnung, Konfiguration, Auswahl und Detaillierung von Betriebsmitteln. (Ponn et al. 2008, S.229)

Die Planung der Montageprozesse folgt folgenden Schritten:

1. Analyse und Zerlegung (Top-Down-Vorgehen, wobei große Aufgaben in immer kleinere Teilaufgaben zerlegt werden) der notwendigen Arbeitsgänge bis zu den elementaren Fügeoperationen, inklusive nicht wertschöpfender Bestandteile wie z.B. „Wenden des Werkstücks“. Investitionsplanung für die notwendigen Werkzeuge, Betriebsmittel.
2. Verschieben der Arbeitsinhalte bis zu einer zeitoptimalen Abtaktung.
3. Durchführung einer Risikoanalyse für den Prozess, Identifikation der Risiken und Ableitung von Maßnahmen.

4. Überarbeitung der Investitionsplanung entsprechend der beschlossenen Maßnahmen.

2.2.1 Optimierung des Montageprozesses nach der Zeit

Die Montage beansprucht je nach Produkt 15% bis 70% der Gesamtfertigungszeit. Im Maschinenbau liegt der Montagezeitanteil, je nach Komplexität des Objektes, zwischen 20% und 45%. Im Fahrzeugbau beträgt er, abhängig von der Fertigungstiefe, 30% bis 50%. Der höchste Montagezeitanteil mit 40% bis 70% findet sich in der Elektro- und Feinwerktechnik. (Lotter et al. 2006, S.3)

Durch Anwendung von Methoden der Zeitdatenermittlung können den einzelnen, mittels einer Arbeitsablaufanalyse identifizieren Ablaufarten Zeiten zugeordnet werden. Diese werden Zeitarten (z.B. Haupttätigkeitszeit) genannt. Zu den Zeitarten können sowohl Ist-Zeiten als auch Soll-Zeiten ermittelt werden. Ist-Zeiten sind die tatsächlich von Menschen und Betriebsmitteln für die Ausführung bestimmter Ablaufabschnitte benötigten Zeiten. Soll-Zeiten sind Zeiten, die Menschen und Betriebsmittel planmäßig für die Ausführung bestimmter Ablaufabschnitte benötigen. Die existierenden Methoden lassen sich in rechnerisch-analytische Verfahren und beobachtenden Verfahren unterteilen. Im Folgenden soll ein Überblick über einige Methoden der beiden Gruppen gegeben werden. Auf die Verfahren nach MTM (method-time measurement) und REFA soll wegen ihrer großen Bedeutung in der industriellen Praxis genauer eingegangen werden.

2.2.1.1 Experimentelle Methoden

Zu den experimentellen Methoden gehören die Multimomentverfahren und die Zeiterfassung nach REFA:

- Das **Multimomentverfahren**, das auch unter dem Begriff „work sampling“ bekannt ist, ist eine „für das Arbeitszeitstudium auf

Grundlage der mathematischen Stichprobentheorie entwickelte Häufigkeitsstudie.“ (Oppitz et al. 2004, S.219)

Die Beobachtungen an den Arbeitsplätzen werden hier nur stichprobenartig durchgeführt und daraus Aussagen über Häufigkeit und Dauer der Tätigkeiten mit einer gewissen Genauigkeit abgeleitet. (Schlick 2010, S.675–676)

- Die **Zeitaufnahme nach REFA** (1997) ist gemäß einer Umfrage des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft e.V. die mit Abstand meist angewandte Methode der Zeitdatenermittlung. 50% der befragten Unternehmen gaben an, Zeitdaten vorrangig mit dieser Methode zu ermitteln. Die Bedeutung der Methode liegt vor allem darin begründet, dass sie flexibel einsetzbar, verhältnismäßig einfach zu erlernen ist und die intensive Beobachtung bestehender Arbeitsabläufe¹ das Erkennen von Verbesserungspotenzialen erleichtert (Schlick 2010, S.672)

Mit der Anwendung der Methodik der Zeitaufnahme sind eine Reihe von Vor- und Nachteilen verbunden. Folgende Vorteile lassen sich anführen:

- Die Methode der Zeitaufnahme ist im Vergleich zu Systemen vorbestimmter Zeiten relativ einfach zu erlernen, d.h. der Qualifizierungsaufwand ist vergleichsweise gering.
- Die Methode der Zeitaufnahme liefert neben Soll-Zeitdaten auch Ist-Zeitdaten als Zwischenergebnis, so dass nach einer Methodenanwendung stets auch Aussagen zum tatsächlichen Leistungsstand gemacht werden können.

¹ Hier ist die Ähnlichkeit mit dem Vorgehen beim Wert-Strom-Design (WSD) offenkundig: Da auch das WSD den Schwerpunkt auf die Zeit (hier Durchlaufzeit) legt, findet auch hier die wesentliche Analyse durch Beobachten des Arbeitsablaufes statt. [Rother 2000 #195]

- Die Methode der Zeitaufnahme ist sehr flexibel einsetzbar. Es ist erstens möglich, ausschließlich Zeitmessungen ohne Leistungsgradbeurteilungen durchzuführen, um sich in kurzer Zeit ein Bild von der Ausgangssituation machen und erste Verbesserungspotenziale identifizieren zu können. Zweitens sind die Zeitmessungen nicht auf Tätigkeiten der Arbeitsperson beschränkt, sondern können sich auch auf Betriebsmittel und Arbeitsgegenstände beziehen.

Die über eine Zeitaufnahme generierten Soll-Zeiten basieren auf dem tatsächlich beobachteten Arbeitsablauf.

Den genannten Vorteilen steht eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

- Das Beurteilen des Leistungsgrades führt insbesondere dann zu kontroversen Diskussionen zwischen Beschäftigten und der Planung, wenn die ermittelten Soll-Zeitdaten in die Berechnung eines leistungsbezogenen Entgeltbestandteils eingehen.
- Die Beurteilung des Leistungsgrades ist nicht objektiv. Schwankungen bei der Leistungsgradbeurteilung sind aufgrund individueller Abweichungen nicht auszuschließen. Die Messung der Zeiten in Sekunden oder sogar in Bruchteilen von Sekunden spiegelt dabei eine nicht vorhandene Präzision vor.
- Im Vergleich zu den Systemen vorbestimmter Zeiten können Zeitaufnahmen nur durchgeführt werden, wenn der entsprechende Montageprozess schon existiert, d.h. im normalen Serienbetrieb arbeitet.
- Vor dem Hintergrund einer steigenden Innovationsdynamik, die sich in verkürzenden Entwicklungs- und Time-to-Market-Zeiten widerspiegelt, erweist sich die Abhängigkeit der

Methode von einem bestehenden Montageprozess zunehmend als Nachteil.

- Änderungen am Prozess machen eine erneute Zeitaufnahme erforderlich, während bei Systemen vorbestimmter Zeiten lediglich einzelne Prozessbausteine oder Zeiteinflussgrößen zu modifizieren sind.
- Im Vergleich zum Multimomentverfahren, mit dem sich recht wirtschaftlich ein repräsentatives Bild zu der Ist-Situation in einem Bereich erzielen lässt, wird bei der Zeitaufnahme üblicherweise nur ein Arbeitsablauf im Detail analysiert. (Schlick 2010, S.674–675)

2.2.1.2 Analytische Methoden

Analytische Methoden sind die Systeme vorbestimmter Zeiten, die die Bewegungsabläufe des Arbeiters in elementare Bewegungen zerlegen und diesen Bewegungen festgelegte Zeiten zuordnen.

Neben dem bekannten MTM (methods-time measurement) ist auch die Work-Factor-Analyse (WF-Analyse) zu den Verfahren vorbestimmter Zeiten zu zählen:

- Das **Work-Factor-Verfahren** unterscheidet die acht Standardelemente Bewegen, Greifen, Vorrichten, Fügen, Ausführen, Demonstrieren, Loslassen und geistige Vorgänge. Zur Bestimmung der Sollzeiten wird untersucht, welches Körperteil bewegt wird, welcher Weg dabei zurückgelegt wird, welches Gewicht bzw. gegen welchen Widerstand bewegt werden muss und welche Bewegungsbeherrschung dafür erforderlich ist. Im Gegensatz zum MTM-Verfahren werden jedoch keine qualitativen Beurteilungen (einfache oder schwierige Bewegung) vorgenommen. (Bühner 2004, S.33)
- Die Vorgehensweise nach **MTM (methods-time measurement)** ist das heute am häufigsten genutzte Gestaltungs- und Optimierungswerkzeug für Arbeitsabläufe (Klose-Hegewald 2009,

S.3) und damit wichtige Methode zur Durchführung des ersten und zweiten Schrittes der Planung von Montageprozessen. *"Grundlegend für die Entwicklung der Verfahren vorbestimmter Zeiten waren die Forschungen des Amerikaner Gilberth, der den Schwerpunkt seiner Untersuchungen von der Zeitstudie auf die Bewegungsstudie verlagerte. Er stellte nämlich fest, dass jede manuelle Tätigkeit in eine begrenzte Anzahl von Elementarbewegungen zerlegt werden kann. [...] Ein weiterer entscheidender Schritt auf dem Wege der Entwicklung [...] gelang dem Amerikaner Segur im Jahre 1927, als er erkannte, dass die Zeit für die Ausführung der einzelnen Elementarbewegungen bei einem bestimmten Grad der Geschicklichkeit und Anstrengung innerhalb vernünftiger Grenzen als konstant angesehen werden kann. Mit dieser Erkenntnis war der Weg für die Neuorientierung des Arbeits- und Zeitstudiums frei. Es eröffnete sich nämlich nun die Möglichkeit, die für die Ausführung der einzelnen Elementarbewegungen benötigte Zeit in tabellarischer Form aufzufassen."* (Becks 1998)

Zum MTM-Grundsystem, das auch als MTM-1 bezeichnet wird, wurden eine Reihe verdichteter Analysiersysteme entwickelt. Zu diesen zählen bspw. die MTM-Standarddaten, MTM-2, MTM-3, MTM-V, MTM-C, MTM-UAS und MTM-MEK. Im deutschsprachigen Raum sind vor allem die MTM-Standarddaten, MTM-UAS (Universelles Analysiersystem) und MTM-MEK (MTM für die Einzel- und Kleinserienfertigung) von praktischer Relevanz.

Das System MOST² wurde auf Basis des MTM-Grundsystems entwickelt und wird in erster Linie im US-amerikanischen Raum angewendet. Die Analyse von Arbeitsabläufen erfolgt bei MOST – im Unterschied zu den MTM-Analysiersystemen – mit Hilfe standardisierter Bewegungssequenzmodelle. Die Ausprägung einer

² Maynard Operation Sequence Technique

Zeiteinflussgröße wird jeweils über eine Indizierung einzelner Modellparameter berücksichtigt. Die Entwickler von MOST führen als Vorteil ihrer Methode die vergleichsweise hohe Analysiergeschwindigkeit an. (Schlick 2010, S.698)

Bei der MTM-Analyse werden sämtliche vom Menschen ausgeführten Bewegungen auf bestimmte Grundbewegungen zurückgeführt, für die die benötigte Zeit bekannt ist. Die kleinsten Bewegungseinheiten sind dabei in der Methode MTM-1 erfasst, die den Arbeitsablauf in Abschnitte wie „Hinlangen“, „Greifen“, „Bringen“, „Loslassen“, „Gehen“ aufteilt.

„Im Montagebereich gilt, dass voll beeinflussbare Arbeitsabläufe bis zu 85 % aus den [...] fünf Grundbewegungen [Hinlangen-Greifen-Bringen-Fügen-Loslassen] bestehen“ (Lotter et al. 2006, S.64).

Zu diesen Grundbewegungen sind in Tabellen empirisch mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen ermittelte Zeiten hinterlegt, meist noch in Abhängigkeit weiterer Parameter, wie der mit der Bewegung zurückgelegten Entfernung (Lotter et al. 2006, S.64). Sie sind bei MTM-1 in Englisch mnemotechnisch codiert. (zum Beispiel „R“ für Reach [Hinlangen]). Diese Grundelemente benutzt der Planer, um durch Kombination der Elemente auf systematische Weise die benötigten Zeiten zu errechnen und - durch geschicktes Verschieben einzelner Arbeitsinhalte - eine optimale, möglichst gleichmäßige Verteilung der Arbeitsinhalte über eine Reihe von Montagearbeitsplätzen einer Montagelinie zu erreichen.

Es wird davon ausgegangen, dass die per MTM ermittelte Zeit derjenigen entspricht, die von einem durchschnittlichen geübten Werker über einen ganzen Arbeitstag hinweg erreicht werden kann. Dies entspricht einem Leistungsgrad von 100%. Abhängig von der persönlichen Leistungsfähigkeit des Werkers können aber auch bis zu 130% erreicht werden. Dieser Ansatz der Montageplanung

ermöglicht es, möglichst nahe an den realen Bedingungen im Vorfeld Montagezeiten vorherzusagen und damit die Ausbringung einer Montagelinie oder den Bedarf an Mitarbeitern zu ermitteln. Das Problem bei dieser Methode der Montageplanung ist die – für diese Methode völlig korrekte – Annahme der fehlerfreien Abläufe. Bei der Planung der Prozesse wird folglich davon ausgegangen, dass die Mitarbeiter keine Fehler machen.

2.2.2 Optimierung des Montageprozesses nach der Qualität

Der Begriff Qualität leitet sich aus dem Lateinischen „qualitas“ her und bedeutet Beschaffenheit, Eigenschaft, Zustand.

Die Definition der Qualität lautet: *„Qualität ist die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit (Produkt oder Dienstleistung) bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen.“* (DIN EN ISO 9000:2005-12)

Heutzutage werden unterschiedlichste Methoden zur systematischen und ganzheitlichen Produkt- und Qualitätsplanung in Unternehmen verschiedenster Bereiche eingesetzt. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die verwendeten Methoden. Der Grundsatz all dieser Verfahren liegt in der Prävention von Fehlern und damit der Vermeidung oder zu mindestens Behebung von Fehlern, bevor das Produkt in die Nutzungsphase eintritt. (Hehenberger 2011, S.202)

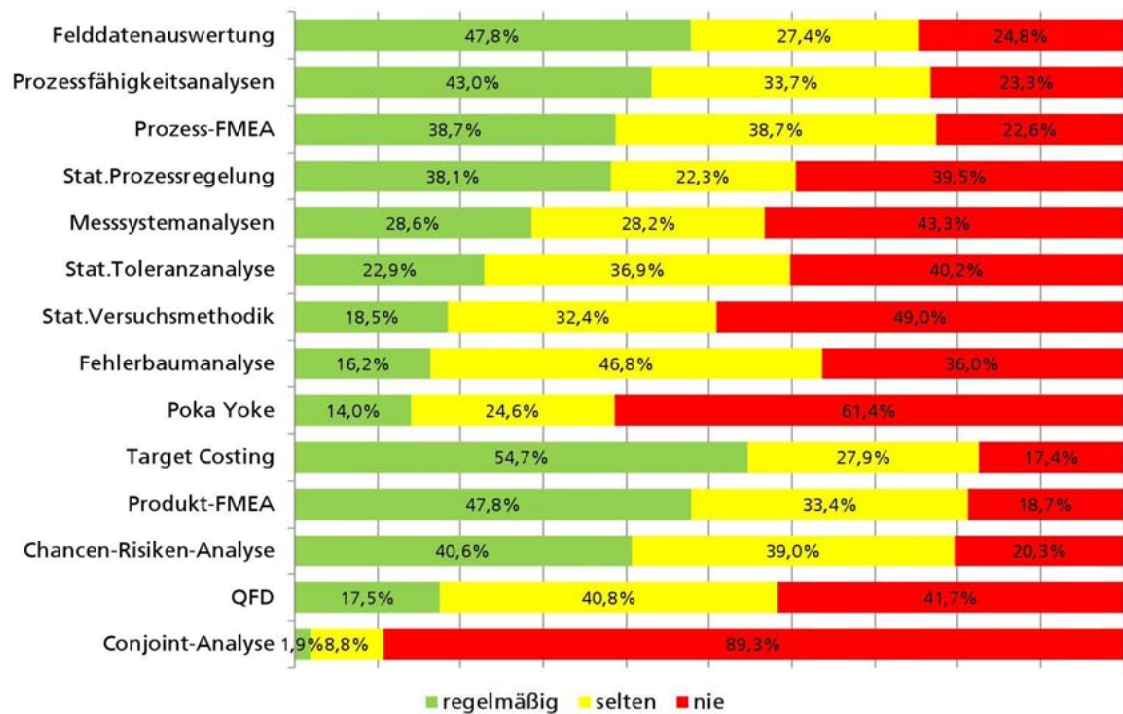


Abbildung 5 QM-Methoden im Vorfeld der Produktion nach (Pfeifer 2002)

Einige für die Montageplanung relevanten Methoden sollen im Folgenden aufgezeigt und die FMEA, als wichtigstes Verfahren der präventiven Qualitätssicherung, näher betrachtet werden:

- Die **Fehlerbaumanalyse FTA** ist eine Top-Down Methode, bei der ausgehend von einer System-Fehlfunktion, dem sogenannten Top-Ereignis, systematisch durch logische Verknüpfungen in einer Baumstruktur die Ursachen für diese aufgezeigt werden (Masing et al. 2007, S.463). Während die FMEA nach Meinung von (Hering et al. 2003, S.137) ein Team dabei unterstützt, intuitiv nach Fehlern zu suchen, arbeitet die FTA systematisch und liefert „bei konsequenter Anwendung alle Ereigniskombinationen, die zum unerwünschten Ereignis führen“.³ Ziel der FTA ist neben dem Aufzeigen aller

³ Seit der Beschreibung des FMEA-Vorgehensweise durch den VDA und der Überarbeitung in (VDA-QMC (2008)) ist der Vorwurf, die FMEA arbeite „intuitiv“, nicht mehr gerechtfertigt. Durch die Analyse der Funktionen und Funktionsstrukturen ist die systematische Betrachtung aller Fehlermöglichkeiten gegeben.

möglichen Ausfallursachen und Fehlerkombinationen auch eine quantitative Auswertung der Fehlerbäume (Hehenberger 2011, S.203).

- Ein Verfahren das in den Schritten von der Entwicklung bis zur Serienfertigung Anwendung findet ist die **Entwicklungsbewertung**, früher auch unter dem Begriff **Design Review** bekannt. Hierbei handelt es sich um eine „systematische, umfassende und dokumentierte Untersuchung eines Entwicklungsergebnisses“ (Masing et al. 2007, S.391). Mittels Meilensteinen, sogenannten „Quality Gates“, werden kritische Stellen im Entwicklungsprozess gekennzeichnet, an denen festgestellt werden muss, ob der geforderte Entwicklungsstand bzw. die geforderte Qualität erfüllt ist. Diese Quality Gates sind jedoch nicht nur auf den Entwicklungsprozess beschränkt, sondern können auch für den gesamten Produktionsprozess des Unternehmens festgelegt werden. (Kamiske et al. 2007, S.56) Eine Sonderform der Entwicklungsbewertung stellt das Design Review Based on Failure Mode (DRBFM) dar. Durch eine aus der FMEA abgeleitete Vorgehensweise werden durch Konzentration auf die Änderungen des Produktes bzw. des Prozess die „produkt- und prozessinhärenten Risiken sehr systematisch und konsequent identifiziert und eliminiert“ (Gamweger et al. 2008, S.144).
- Zur Minimierung von Fehlerkosten wird die **Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse FMEA** eingesetzt (Lesmeister 2001, S.21). Die Vorgehensweise nach den Schriften des Verbandes deutscher Automobilhersteller VDA ist heute gängige Praxis (Bertsche et al. 2004, S.107). Die FMEA für den Prozess umfasst die Schritte Systemstrukturierung, Funktionszuordnung, Ermittlung der Fehlfunktionen, Verknüpfen der Funktionen und Fehler zu den jeweiligen Netzen, Bewertung der Bedeutung, der Auftretenswahr-

scheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit und Ableiten der notwendigen Maßnahmen zur Risikominimierung.

2.2.2.1 Grundzüge zur System-FMEA

Zu Beginn unterschied man je nach Fokus und Zielrichtung zwischen der Konstruktions-FMEA und der Prozess-FMEA. Bei der Konstruktions-FMEA lag der Fokus der Fehleranalysen nur auf der Bauteilebene, und bei der Prozess-FMEA wurden nur die Einflüsse in einem einzigen Prozessschritt untersucht.

Mit dieser traditionellen Herangehensweise der FMEA wurden Einflüsse, die über die Systemgrenzen des Bauteils, beziehungsweise des Prozesses hinausgingen, nicht berücksichtigt. Hieraus ergaben sich Nachteile. Bei der Konstruktions-FMEA fand

der funktionale Zusammenhang bei den in der Bauteilgruppe vorhandenen Bauteilen keine Berücksichtigung, und zum anderen wurde bei der Prozess-FMEA nicht der gesamte Herstellungsprozess analysiert.

Seit der Überarbeitung und der Veröffentlichung des VDA Band 4, Teil 3 im Jahr 2006 unterteilt man nur noch in Produkt-FMEA und Prozess-FMEA. Sie sind aber nicht als voneinander unabhängig zu betrachten, viel mehr besteht eine Durchgängigkeit in der Form, dass die Fehlerfolgen der einen Ebene die Fehler der nächsten Ebene repräsentieren. Der formale Zusammenhang zwischen den verschiedenen FMEA-Arten ist in Abbildung 6 dargestellt.

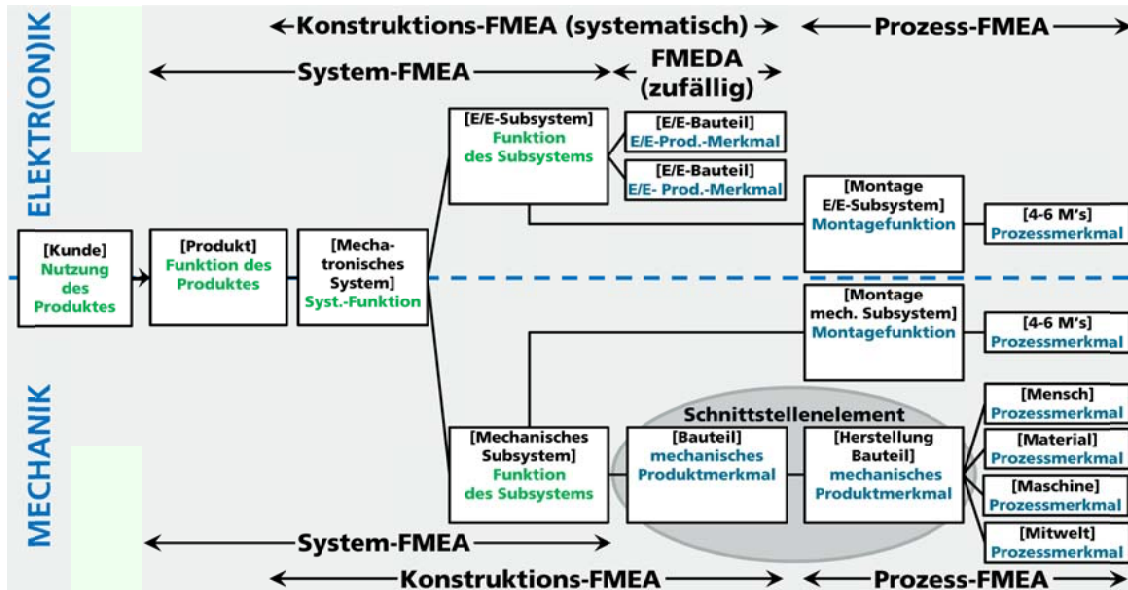


Abbildung 6 Zusammenhang Produkt- und Prozess-FMEA (Schloske 2010)

2.2.2.2 Produkt-FMEA

Die Produkt-FMEA wird in der Frühphase des Produktentstehungs-Prozesses angewendet. Ihr obliegt die Aufgabe, das Produkt auf Erfüllung der im Pflichtenheft festgelegten Funktionen zu überprüfen. Der Fokus der Betrachtung liegt hierbei auf der Gesamtheit einer Baugruppe, sowie dem funktionalen Zusammenhang der einzelnen Bauteile.

Die Produkt-FMEA findet Anwendung

- In der Konzeptphase, um Entscheidungen auf der Basis möglicher Fehlfunktionen bei alternativen Konzeptvarianten zu ermöglichen.
- In der Entwicklungs- und Konstruktionsphase, um mögliche Fehlfunktionen und Risiken aus Kundensicht zu erkennen und Maßnahmen zur Beseitigung bzw. Minimierung der Risiken und Fehlfunktionen festzulegen.
- In der Versuchsphase, um die Versuche gezielt auf die erkannten Risiken und möglichen Fehlfunktionen abzustimmen.

2.2.2.3 Prozess -FMEA

Der Prozess-FMEA wird während des Produktionsplanungsprozesses angewandt. Hierbei werden nicht nur die Fehlerursachen bei den einzelnen Prozessschritten betrachtet, sondern es wird der komplette Herstellungsprozess anhand der beteiligten Systemelemente Mensch, Maschine, Material, Methode und Mitwelt strukturiert und beschrieben.

Die Prozess-FMEA findet Anwendung:

- In der Vorplanungsphase, um die Eignung von möglichen Alternativ-Prozessen zu untersuchen.
- In der Phase der Fertigungsplanung, um Schwachstellen bei der späteren Fertigung sichtbar zu machen und Abhilfemaßnahmen zu schaffen.
- In der Vorserienphase, um die möglichen Abhilfemaßnahmen durch gezielte Untersuchungen auf ihre Wirksamkeit zu prüfen.

2.2.2.4 Grundlagen der FMEA

Die FMEA ist eine analytische Methode der präventiven System- und Risikoanalyse und basiert auf dem Ansatz, dass Fehler, die nicht auftreten, auch nicht behoben werden müssen. Durch die Entwicklung der FMEA-Methodik wurde ein Instrumentarium zur systematischen Qualitätsanalyse und -planung geschaffen, das für jeden verständlich und anwendbar ist. Darüber hinaus erlaubt es die Methode, bestehende Produkte und Prozesse zu verbessern. Diese liefert nach (VDA-QMC) folgende Ergebnisse:

- Ursachenanalyse, Abstellmaßnahmen
- Sicherheitsnachweis für eine Freigabe z.B. von Prüforganisationen
- Systematische Prozessoptimierung
- Aufbau einer Wissensbasis
- Dokumentation von Erfahrungen
- Lastenheftabstimmung
- Definition der Kunden-Lieferanten-Schnittstelle

- Bestimmung der Bedeutung von Fehlfunktionen aus Kundensicht

Wird die Methode der FMEA richtig eingesetzt, hilft sie Qualitätsprobleme frühzeitig zu entdecken und deren Auftreten durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Dadurch wird es möglich, die an die Produkte gestellten Qualitätsforderungen zu erfüllen und gleichzeitig die Fehler- und Fehlerfolgekosten zu reduzieren.

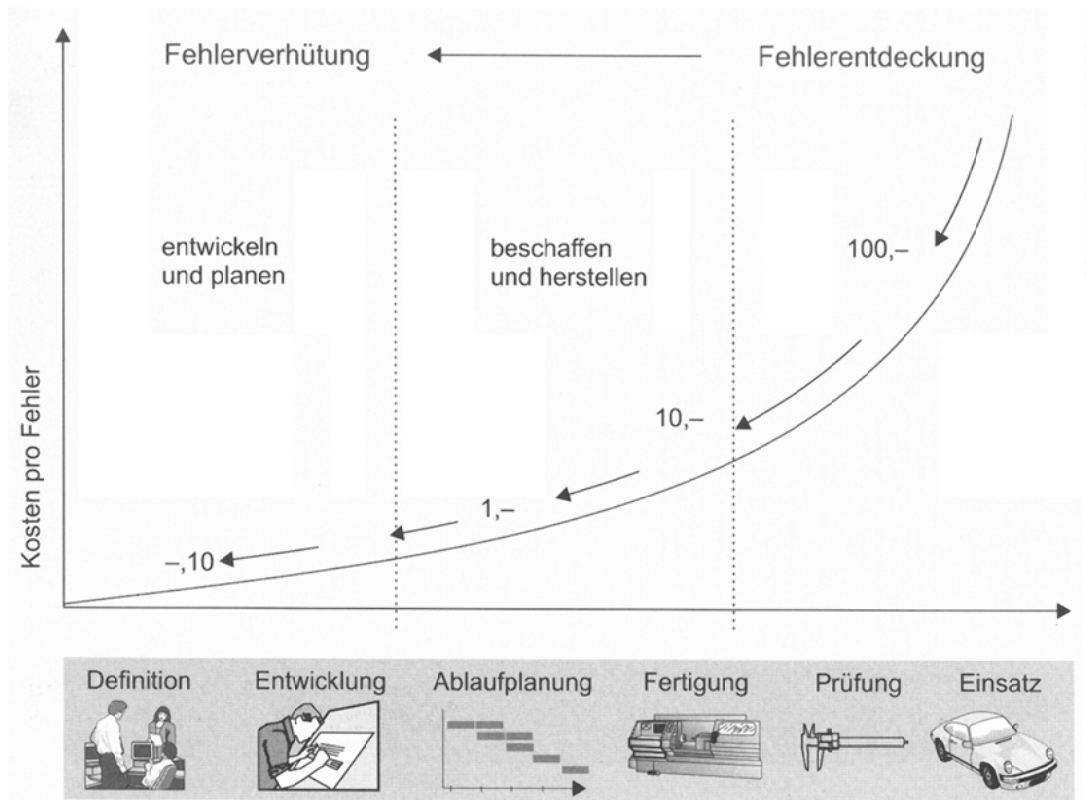


Abbildung 7 Fehlerkosten im Produktlebenslauf (Pfeifer 1996)

Die in (Pfeifer 1996) definierte „Rule-of-ten“ (siehe dazu Abbildung 7)⁴ ist, wie der Verfasser anmerken muss, in der Realität leider noch viel zu optimistisch. Es sei hier nur auf die Rückrufaktionen einiger großer Automobilhersteller während des Beginns des 21. Jahrhunderts

⁴ Die Entstehung der „Rule-of-ten“ ist leider heute nur noch schwer nachvollziehbar – dem Verfasser sind mehrere Personen bekannt, die sie glaubhaft als ihre Schöpfung reklamieren.

hingewiesen. „Die Kosten dieser Aktionen können dreistellige Millionenbeträge erreichen.“ (Wannenwetsch 2005, S.11) . Die Kosten für die Industrie lassen sich auch aus den jährlich veröffentlichten Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) abschätzen (KBA 2010, S.62).

Insgesamt haben Entscheidungen, die während der Entwicklungsphase eines Produktes getroffen werden, erheblichen Einfluss auf die Folgekosten. Bereits während des Entwicklungsprozesses werden siebzig bis achtzig Prozent der gesamten Kosten im Lebenszyklus des Produkts festgelegt (Lotter et al. 2006, S.5). Um einen größtmöglichen Erfolg im Projekt zu erzielen, sollte mit der Erstellung einer FMEA zu einem frühen Zeitpunkt begonnen werden.

2.2.2.5 Ablauf der Prozess-FMEA

Der Ablauf einer Prozess-FMEA gliedert sich nach (VDA-QMC) in fünf Schritte:

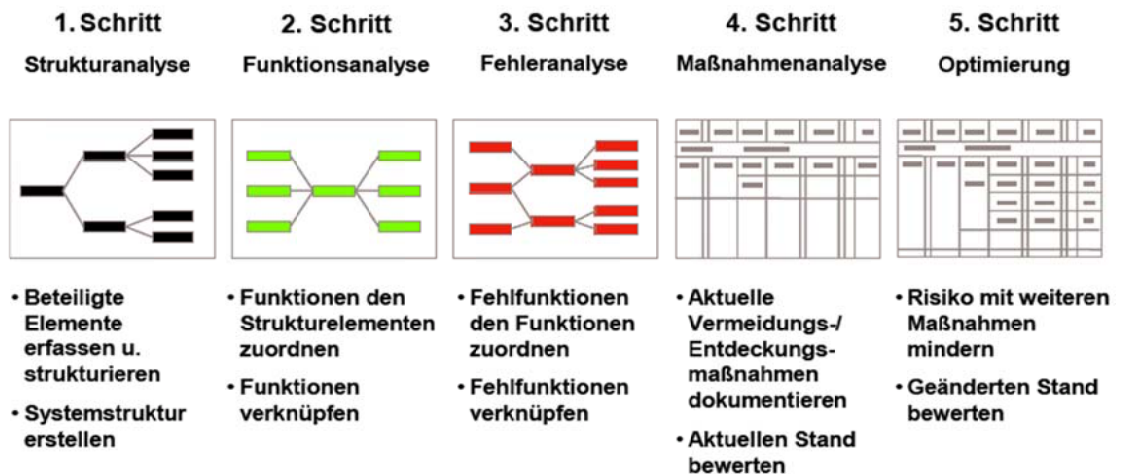


Abbildung 8 Ablauf der FMEA (VDA-QMC)

Schritt 1 – Strukturanalyse

Die Systemdetaillierung erfolgt dadurch, dass der Prozess in der ersten Phase systematisch in einer Top-Down-Vorgehensweise in einzelne Schritte untergliedert wird. Hieraus ergibt sich, wie in Abbildung 9 dargestellt, eine

abgebildete Systemstruktur. Diese wird auch als System- oder Strukturbaum bezeichnet.

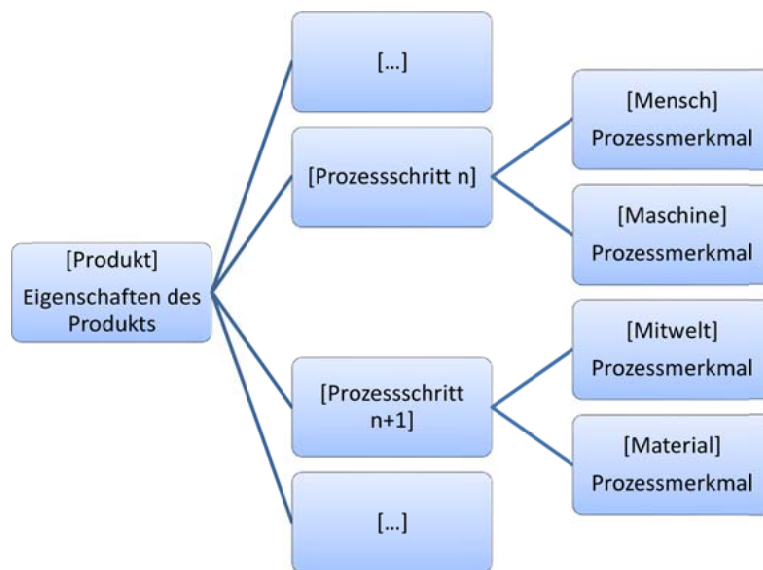


Abbildung 9 System und Systemstruktur nach VDA

Schritt 2 – Funktionsanalyse

Die Systemstruktur bildet die Grundlage für weitere differenziertere Analysen der Systemelemente (SE) hinsichtlich ihrer Funktionen und Fehlfunktionen. Im nachfolgenden Schritt wird jedem Element des System- oder Strukturbaumes die geforderte Funktion zugeordnet. Das Zusammenwirken der Funktionen einzelner SE wird durch Verknüpfen der Funktionen als Funktionsstruktur (Funktionsbaum/Funktionsnetz) dargestellt.

Schritt 3 – Fehleranalyse

Für jedes betrachtete System und den abgeleiteten einzelnen Systemelementen muss eine Fehleranalyse durchgeführt werden. Mögliche Fehler (F) setzen sich aus den logisch abgeleiteten Fehlfunktionen, sowie aus dem Erfahrungsschatz der Teammitglieder zusammen. Darüber hinaus unterscheidet man mögliche Fehlerursachen (FU), dies sind die möglichen Fehler der untergeordneten Systemelemente und mögliche Fehlerfolgen

(FF), sowie die dadurch resultierenden Fehler der übergeordneten Systemelemente.

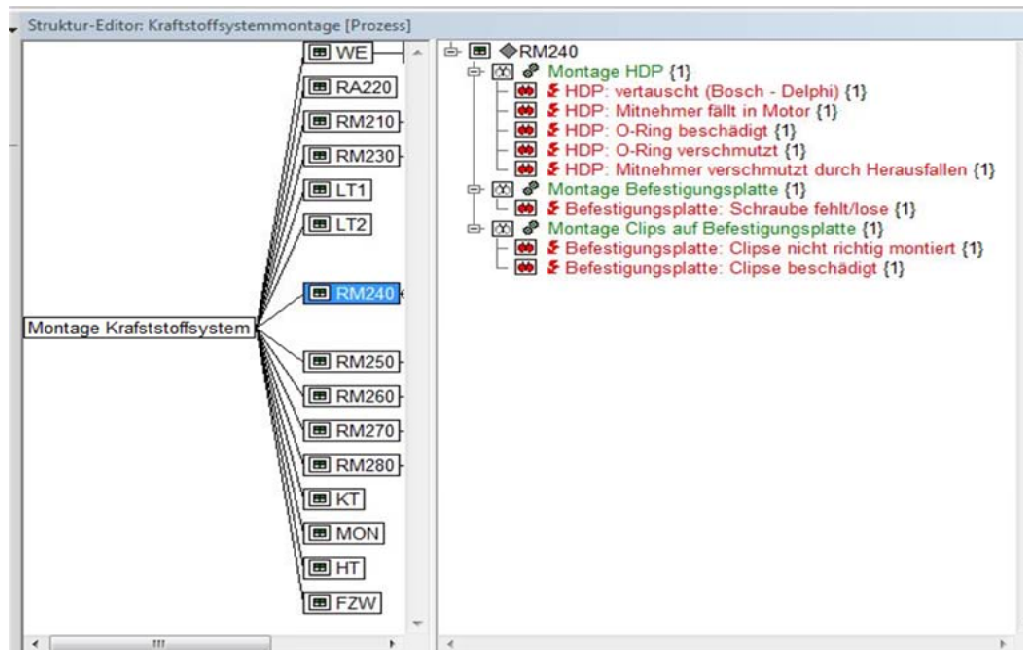


Abbildung 10 FMEA-Struktur mit Funktionen und Fehlfunktionen

Anhand dieser Gliederung wird ausgehend von einem Fehler (F) durch Zuordnung der Fehlerursachen (FU) und Fehlerfolgen (FF) das Fehlfunktionsnetz geknüpft, welches die Basis für das FMEA-Formblatt ist.

Schritt 4 – Maßnahmenanalyse

Die Maßnahmenanalyse⁵ bei der FMEA erfolgt über die Bewertung der drei Einzelfaktoren:

- B = Bedeutung der Fehlerfolgen (= Schwere der Auswirkung des Fehlers)
- A = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache unter Berücksichtigung aller wirksamen Vermeidungsmaßnahmen
- E = Entdeckungswahrscheinlichkeit für jede Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursache, unter Berücksichtigung aller wirksamen Entdeckungsmaßnahmen.

⁵ Nach Meinung des Verfassers wäre der Begriff „Risikobewertung“ hier treffender.

Bewertungszahl für die Bedeutung B	Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit A	Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit E
<p>Sehr Hoch 10 Sicherheitsrisiko, Nichterfüllung gesetzlicher Vorschriften, Liegenbleiber.</p> <p>Hoch 8 Funktionsfähigkeit des Fahrzeuges stark eingeschränkt, sofortiger Werkstattaufenthalt zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung wichtiger Teilsysteme.</p> <p>Mäßig 6 Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs eingeschränkt, sofortiger Werkstattaufenthalt nicht zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung von wichtigen Bedien- und Komfortsystemen.</p> <p>Gering 3 Geringe Funktionsbeeinträchtigung des Fahrzeuges, Beseitigung beim nächsten planmäßigen Werkstattaufenthalt, Funktionseinschränkung von Bedien- und Komfortsystem.</p>	<p>Sehr Hoch 10 Sehr häufiges Auftreten der Fehlerursache, 9 unbrauchbarer, ungeeigneter Prozess.</p> <p>Hoch 8 Fehlerursache tritt wiederholt auf, 7 ungenauer Prozeß</p> <p>Mäßig 6 Gelegentlich auftretende Fehlerursache, 5 weniger genauer Prozeß.</p> <p>Gering 3 Auftreten der Fehlerursache ist gering 2 genauer Prozeß</p>	<p>Sehr gering 10 Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist unwahrscheinlich, die Fehlerursache wird oder kann nicht geprüft werden</p> <p>Gering 8 Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist weniger wahrscheinlich, wahrscheinlich nicht zu entdeckende Fehlerursache, unsichere Prüfungen</p> <p>Mäßig 6 Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist wahrscheinlich, Prüfungen sind relativ sicher.</p> <p>Hoch 3 Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist sehr wahrscheinlich, Prüfungen sind sicher, z.B. mehrere voneinander unabhängige Prüfungen</p>
<p>Sehr gering 1 Sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung, nur vom Fachpersonal erkennbar.</p>	<p>Sehr gering 1 Auftreten der Fehlerursache ist unwahrscheinlich.</p>	<p>Sehr hoch 1 Aufgetretene Fehlerursache wird sicher entdeckt.</p>

Abbildung 11 Vorschlag eines Bewertungskatalogs für eine Prozess-FMEA nach VDA

Die Bewertungszahlen dieser Einzelfaktoren können Werte zwischen 1 und 10 annehmen, die semantische Zuordnung dieser Zahlen ist in Abbildung 11 dargestellt.

Durch Multiplikation der Einzelfaktoren lassen sich diese zur Risikoprioritätszahl (RPZ) zusammenfassen.

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \quad (2.1)$$

Die RPZ ist im Gegensatz zur weit verbreiteten Meinung kein Maßstab für das Gesamtrisiko, sie gibt lediglich einen Anhaltswert der zu erwartenden Risiken wieder.

„Die Betrachtung des Absolutwertes einer Risikoprioritätszahl ist in vielen Fällen irreführend und als Grundlage für weitere Maßnahmen nicht geeignet. Auch ein relativer Vergleich der einzelnen Risikoprioritätszahlen kann irreführend sein.

[...] Somit hat die RPZ eine geringe Aussagekraft bzgl. der Qualität von Produkten und Prozessen.“ (VDA-QMC, S.68)

Schritt 5 – Optimierung

Ursprünglich gliederte man die Risiken ausschließlich nach der RPZ.

Erreichte dieser den Schwellenwert von 125 oder höher, wurde daraus die Notwendigkeit von Risikominimierungsmaßnahmen abgeleitet (Tietjen et al. 2003, S.33). Die RPZ zeigt die typischen Probleme zu sehr verdichteter Kennzahlen, d.h. drei völlig unterschiedliche Sachverhalte werden in eine Kennzahl gezwängt. Der moderne Ansatz ist die Vermeidung dieser Verdichtung durch separate Betrachtung der Faktoren, wie in Abbildung 12 gezeigt.

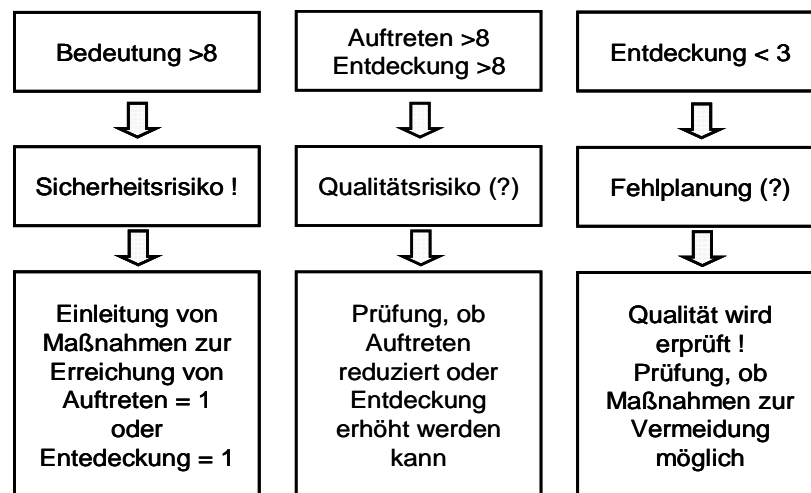


Abbildung 12 Priorisierung nach Faktoren A, B und E nach (Schloske 2009)

Die Optimierung erfolgt nach folgender Priorisierung:

- Konzeptänderungen, um die Fehlerursachen auszuschließen bzw. die Bedeutung zu reduzieren.
- Erhöhung der Konzeptzuverlässigkeit, um das Auftreten der Fehlerursachen zu minimieren.
- Wirksamere Entdeckung der Fehlerursachen, um zusätzliche Prüfungen zu vermeiden.

Die vorgesehene Optimierungsmaßnahme, inklusive dem für die Umsetzung verantwortlichen Mitarbeiter und des vereinbarten Termins der Optimierung, wird in die Dokumentation aufgenommen. Es erfolgt eine

erneute Wirksamkeitsprüfung der Optimierungsmaßnahme, welche auch dokumentiert wird. Die Phase der Optimierung wird solange wiederholt, bis das Risiko in einem vertretbaren Rahmen liegt.

2.2.2.6 Darstellung der Ergebnisse einer Prozess-FMEA für einen Montageprozess

In Abbildung 13 ist ein Teil des Fehlernetzes einer FMEA-Analyse eines Montageprozesses dargestellt – typisch ist die „Konzentration“ auf eines der „5M“, nämlich den Menschen. Bei genauerer Analyse zeigt sich viermal „vergessen“, zweimal „beschädigt“ (durch das Handling) und einmal „verwechselt“ als Ursache.

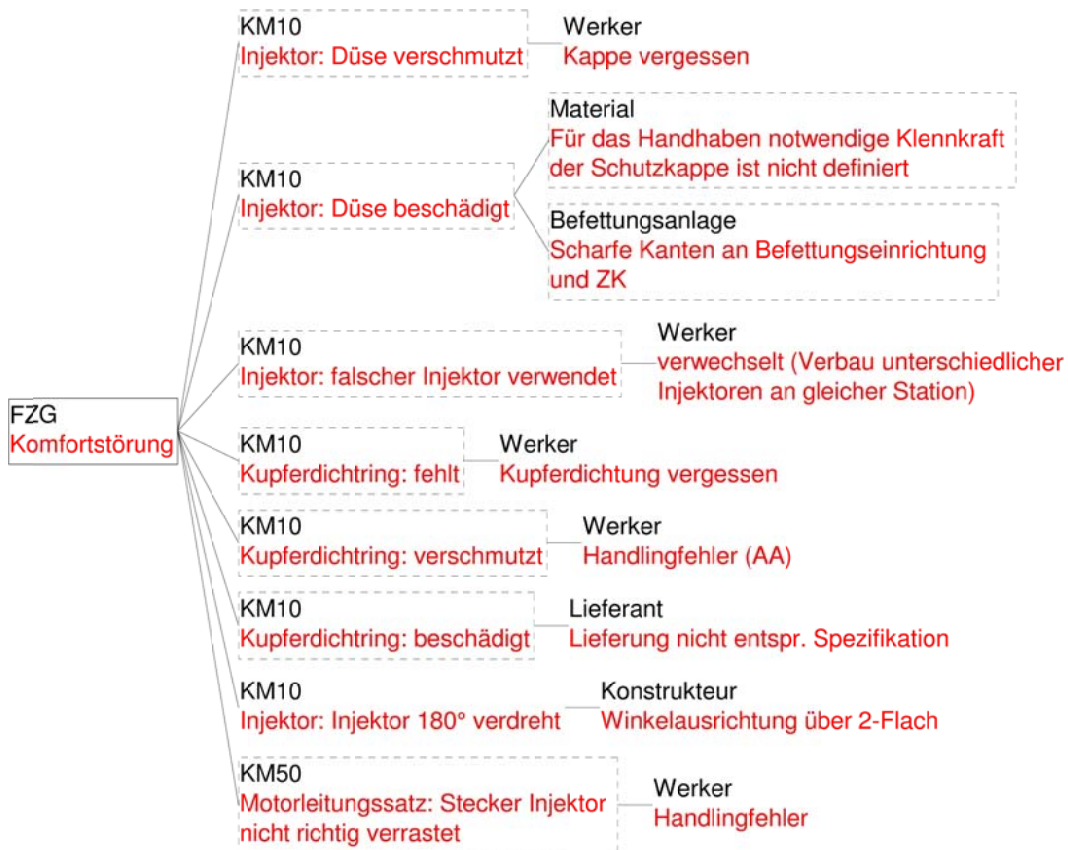


Abbildung 13 (Teil-)Fehlernetz einer FMEA-Analyse

Der interessante Fakt an diesem Beispiel aus der Praxis ist, dass die dem Menschen zugeordneten Fehlerursachen von stochastischer Natur sind,

wogegen die Fehlerursache, die der Anlage („Maschine“) zugeordnet wird, ein systematischer Fehler ist, d.h. sich durch sehr große Werte für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens auszeichnen wird. Das führt dazu, dass der aus Kostengründen häufig gewählte Ansatz, Fehler durch Stichprobenprüfungen zu entdecken, für die vom Menschen verursachten Fehler nicht oder nur unzureichend funktioniert.



Abbildung 14 Problem der Stichprobenprüfung für stochastisch auftretende Fehler (Schloske 2010)

2.2.3 Optimierung des Montageprozesses nach den Kosten

Die Produktionskosten sind seit den ersten Anfängen der Globalisierung in den zentralen Fokus gerückt. Nach (Bullinger et al. 1986, S.72) können die in einem Montagesystem entstehende Kosten in folgende Klassen eingeteilt werden:

- Vorbereitungskosten
- Auftragswiederholkosten
- Ausführungskosten
- Zusatzkosten

Die durch die weit fortgeschrittene Automatisierung der klassischen Fertigungstechnologien, insbesondere in der Zerspanungs- und Kunststoffspritztechnik – das betrifft nicht nur die eigentliche Bearbeitung, sondern auch die unterstützenden Prozesse (Verkettung, DNC) – erzielten

Fortschritte haben die Montage zum teuersten Produktionsprozess werden lassen (Lotter et al. 2006, S.5).

Die Bestrebungen gehen aus diesen Gründen dahin, schon in der Vorbereitungsphase die Kosten möglichst genau zu ermitteln, um frühzeitig Kostentreiber zu eliminieren und das wirtschaftliche Maximum zu erreichen.

Hier soll ein Überblick über die bekannten, für die Anwendung auf die Montage geeigneten Kostenrechnungsarten gegeben werden.

- Das **Target Costing** ist eine Top-Down-Methode, bei der ausgehend von einem festgelegten Kostenziel für das fertige Produkt die zulässigen Kosten für einzelne Komponenten bestimmt werden. „Dem Target Costing liegt demzufolge ein strategisches Kostenmanagement zugrunde, was sich in der frühzeitigen und daher mittel- bis langfristigen Betrachtung der Kostenaspekte eines zu entwickelnden Produktes und den daraus resultierenden umfassenden Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten äußert.“ (Seidenschwarz 2004, S.70–74)
- In der DIN EN 1325-1 ist die **Wertanalyse** definiert als ein „organisierter und kreativer Ansatz, der einen funktionenorientierten und wirtschaftlichen Gestaltungsprozess mit dem Ziel der Wertsteigerung eines WA-Objektes zur Anwendung bringt“ (DIN EN 1305-1, S.3).
Als WA-Objekt können sowohl Produkte als auch Prozesse angesehen werden, die Wertanalyse ist anwendungsneutral (VDI 2011, S.8). Als Hauptziel der Wertanalyse gelten minimale Kosten ohne eine negative Beeinflussung von Qualität, Zuverlässigkeit und Marktfähigkeit (Preißler 2007, S.222).
- Bei der **Plankostenrechnung** werden Ist-Kosten mit geplanten Kosten verglichen. Diese sogenannten Plankosten werden auf Basis von

Plandaten mittels Verbrauchsmessungen und Kostenanalysen ermittelt. (Mumm 2008, S.357)

Dieser Vergleich stellt „die Grundlage für die Steuerung des Betriebs und die Kontrolle der Wirtschaftlichkeit“ (Schmidt 2008, S.198) dar.

- Die gebräuchlichste und wohl auch am besten geeignete Methode ist die **Prozesskostenrechnung**, die als ein strategieorientiertes Kostenrechnungssystem unter anderem als wirkungsvolles Controlling- Instrument für den Gemeinkostenbereich eingesetzt werden kann (Remer 1997, S.61). Daher soll diese in den darauf folgenden Abschnitten genauer betrachtet werden.

2.2.3.1 Gründe für die Entwicklung der Prozesskostenrechnung

Die Gründe für die Entwicklung eines neuen Kostenrechnungssystems und damit der Prozesskostenrechnung sind vielseitig und lassen sich wie folgt unterteilen:

- Mängel der vergleichbaren Kostenrechnungssysteme (Butz 2010, S.96)
 - Die kurzfristige Ausrichtung lässt keine langfristigen Produktentscheidungen zu.
 - Die willkürliche Zuordnung der Gemeinkosten, d.h. vorherrschende mangelnde Kostentransparenz in den Prozessen.
 - Die eingeschränkte Aussagefähigkeit für Planung und Controlling.
- Veränderung des Wettbewerbs
 - Druck zur Kostensenkung.
 - Intensivierung und Internationalisierung des Wettbewerbs.
 - Verbesserung der Produktqualität.
 - Schnellere Entwicklung neuer Produkte und dadurch kürzere Produktlebenszyklen.

- Abnehmender Homogenitätsgrad des Produktions- und Lieferprogramms.
- Einsatz moderner Fertigungstechnologien (z.B. Arrays von Bearbeitungszentren, flexible Fertigungssysteme).

Ausschlag für die Etablierung der Prozesskostenrechnung in Deutschland sind die ansteigenden Kosten in den indirekten Bereichen (Gemeinkosten). So ist „das Verhältnis der Einzelkosten zu den Gemeinkosten von 70% zu 30% aus den 60er Jahren [...] heute geradezu umgedreht worden auf weniger als 40% zu 60%“ (Remer 1997, S.17). Weder die Vollkostenrechnung noch die Grenzplankostenrechnung sind in der Lage, die Kostenverursachung durch die Produkte in den indirekten Bereichen umfassend abzubilden (Remer 1997, S.25).

Die Prozesskostenrechnung hingegen "zwingt zur Erfassung und Strukturierung der einzelnen Tätigkeiten, Prozesse sowie zu deren Quantifizierung" (Remer 1997, S.61).

2.2.3.2 Ziele der Prozesskostenrechnung

Nachstehend sind die wichtigsten Zielsetzungen der Prozesskostenrechnung herausgegriffen (Remer 1997) und (Butz 2010). Mit Hilfe der Prozesskostenrechnung soll es möglich gemacht werden, die Kostentransparenz der indirekten Leistungsbereiche zu erhöhen. Dies geschieht durch die Zerlegung der Prozesse (so genannte Hauptprozesse) in Teilprozesse, um eine verursachungsgerechte Kostenzuordnung gewährleisten zu können.

Ein weiteres sehr hilfreiches Ziel für die Unternehmen ist die Nutzung dieser Kostendaten für die detaillierte Kapazitäts- und Kostenplanung, und damit die Verbesserung der Produktkalkulation, aber auch als Anstoß für Qualitätsverbesserungen oder zum Aufzeigen von Kostensenkungspotentialen.

Zu beachten ist, dass sich die Prozesskostenrechnung der traditionellen Kostenarten- und Kostenstellenrechnung bedient.

2.2.3.3 Vorgehensweise der Prozesskostenrechnung

Allgemeines Vorgehen (Olshagen 1995; Remer 1997, S.61; Berndt 1998, S.134):

- Bestimmung der Prozesse

Das Vorgehen im Unternehmen wird in Aktivitäten (=Prozesse) unterteilt. Man unterscheidet repetitive, also sich häufig wiederholende, und nicht repetitive Prozesse. Während letztere vernachlässigt werden, unterteilt man die repetitiven Aktivitäten weiterhin in leistungsmengenneutrale und leistungsmengeninduzierte Prozesse. Diese einzelnen Aktivitäten werden zu Hauptprozessen zusammengefasst. Ein Hauptprozess kann definiert sein durch die kostenstellenübergreifende Zusammenfassung von mehreren sachlich zusammenhängenden (Teil-) Prozessen, durch die Zusammenfassung mit anderen Teilprozessen derselben Kostenstelle, oder, wenn eine Zusammenfassung mit anderen Teilprozessen nicht möglich ist, kann ein Teilprozess zugleich ein (unechter) Hauptprozess sein (Olshagen 1995).

- Bestimmung der Prozessgrößen

Sind die Teil- und Hauptprozesse identifiziert sind die jeweiligen Bezugsgrößen (Maßgröße) bzw. Hauptprozessgrößen (cost driver) zu bestimmen. Bei der prozessorientierten Kostenstellenrechnung können nur den leistungsmengeninduzierte Prozessen Bezugsgrößen zugeordnet werden, da sich nur diese Prozesse variabel zum erbringenden Leistungsvolumen der Kostenstelle verhalten.

- Bestimmung der Plan- Prozessmenge

Als Prozessmenge wird die zu einer Bezugsgröße zugehörige messbare Leistung bezeichnet. Auch die Prozessmenge kann wiederum nur für die leistungsmengeninduzierten Prozesse bestimmt werden. Die

Arbeitsergebnisse repetitiver Tätigkeiten können aufgrund ihrer immer wiederkehrenden Weise gezählt werden.

- Ermittlung der Prozesskosten

Für die Ermittlung der Prozesskosten stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung

- Analytische Vorgehensweise:

Für jeden Prozess sind auf Basis der Planprozessmenge alle Kostenarten mit Hilfe technisch-kostenwirtschaftlicher Analysen originär zu planen. Dies stellt die genaueste Möglichkeit dar.

- Vereinfachte analytische Vorgehensweise:

Bei dominierendem Personalkostenanteil ist nur dieser für jeden Prozess analytisch zu planen. Die Raum-, Strom-, Büromaterialkosten werden proportional zu den Personalkosten auf die Prozesse verteilt.

- Verteilungsschlüssel:

Die Kostenstellenkosten werden per Schlüssel (z.B. Mitarbeiterzahl, Flächenbedarf) auf die Prozesse verteilt. Bei der Ermittlung der Prozesskosten müssen nur die leistungsmengeninduzierte Prozesse berücksichtigt werden, da die leistungsmengenneutralen Prozesse schwer planbar sind und in der Regel budgetiert werden.

- Ermittlung der Prozesskostensätze

Für Kalkulationszwecke müssen Kostensätze ermittelt werden. Dazu werden die gesamten Prozesskosten durch die (Plan-) Prozessmenge geteilt. Diese Kostensätze können nur für leistungsmengeninduzierte Prozesse berechnet werden.

- Durchführung der Prozesskostenstellenrechnung

Für einen leistungsmengenneutralen Prozess wie zum Beispiel „Abteilung leiten“ können die Kosten des Prozesses nicht über eine Bezugsgröße und damit auch nicht über eine Planprozessmenge dem Kostenträger zugerechnet werden (Olshagen 1995). Die

leistungsmengenneutralen Prozesse können auf die einzelnen leistungsmengeninduzierten Teilprozesse umgelegt werden. Eine andere Möglichkeit ist eine Erweiterung der Prozesskostenrechnung. In diesem Fall werden zwei Bezugsgrößen für einen Prozess erhoben.

2.2.3.4 Vor- und Nachteile der Prozesskostenrechnung

Als Vorteile der Prozesskostenrechnung ist vor allem die verursachungsgerechte Zuordnung der indirekten Kosten auf die Kostenträger zu sehen. Darüber hinaus erlaubt die Kalkulation mit Prozesskosten eine verursachungsgerechte Produktkalkulation: „Wie viel kostet ein Produkt, bei verursachungsgerechter Zuordnung der direkten Kosten?“

„Trotz dieser Vorteile muss man kritisch anmerken, dass aufgrund des Vollkostenrechnungssystems die Prozesskostenrechnung für kurzfristige Dispositionen ungeeignet ist. Zudem erfolgt auch hier eine Schlüsselung von Gemeinkosten und eine Proportionalisierung der fixen Kosten.“ (Jung 2007, S.104)

Indem die leistungsmengenneutralen Kosten proportional zu den leistungsmengeninduzierten Prozesskostensätzen umgelegt werden, kommt es dadurch zwangsläufig zu verzerrten Informationen bei der Beurteilung der relativen Kostenvorteile gegenüber den Wettbewerbern innerhalb der eigenen betrieblichen Wertschöpfungsstruktur. Aus diesem Grund sollte vermehrt auf die Methode der zwei Bezugsgrößen zurückgegriffen werden.

Auch die Unterstellung eines proportionalen Zusammenhangs zwischen der Änderung der Prozessmenge und der Änderung der Gemeinkosten ist nicht tragbar. Zudem verfügt die Prozesskostenrechnung nicht über eine verursachungsgerechte Zuordnung von Gemeinkosten in Bereichen mit vorwiegend prozessunabhängigen Teilprozessen, was zu weiteren Informationsverzerrungen führen kann. Außerdem finden nicht alle Leistungen im Unternehmen inklusiver der dafür anfallenden Kosten

Berücksichtigung in der Berechnung. Zudem finden die Abweichungs- und Übereinstimmungskosten, die während jedem Produktentstehungsprozess aufkommen, keinerlei Berücksichtigung in der Prozesskostenrechnung. Dennoch ist ein unumstrittener Vorteil der Prozesskostenrechnung die Berechnung der Gemeinkosten. Diese werden nicht mehr nach den Einzelkosten, sondern nach der mengenmäßigen Beanspruchung betrieblicher Ressourcen auf die Produkte geschlüsselt. Somit ist eine Optimierung der Prozessgestaltung durch verbesserte Kostentransparenz in den Gemeinkostenbereichen möglich. *„Die Erhöhung der Transparenz bietet Möglichkeiten zu Rationalisierungs- bzw. Kostensenkungsmaßnahmen in den indirekten Bereichen. Des Weiteren liefert die Prozesskostenrechnung die Grundlage für die Prozessoptimierung, da neben finanziellen auch nicht-finanzielle Größen wie Zeit und Qualität erfasst werden.“* (Schmeisser 2010, S.56)

Wird die Prozesskostenrechnung dahingegen erst neu in ein Unternehmen eingeführt, so wird zunächst eine genaue Betriebsanalyse durchgeführt. Dabei werden Unwirtschaftlichkeiten im Unternehmen aufgedeckt und gegebenenfalls veraltete Kostenrechnungssysteme überarbeitet.

2.3 Ansätze zur Vereinigung von Qualität und Kosten

Zur Erweiterung der Qualitätsoptimierung um die Betrachtung der Kosten gibt es zahlreiche Ansätze. Im Folgenden werden zwei Beispiele genannt, die diesen Ansatz verfolgen.

2.3.1 Integration von Kostenaspekten in die FMEA

In (Haffner 2005) wird die Komplexität eines ausgeprägten Fehlernetzes zur Vereinfachung auf vier Ebenen reduziert, welche die Darstellung des Prozesses vereinfachen sollen.

1. Merkmalsebene

Um die Komplexität der FMEA beziehungsweise der Baumstruktur zu vereinfachen, strukturiert die Merkmalsebene den Prozess oder das Produkt

in Reihenfolge der Arbeitsabfolge und damit entlang der Wertschöpfung, da sich der monetäre Nutzen von Maßnahmen mit dem Grad der Bearbeitung erhöht.

2. Ursachenebene

Nach der klassischen Betrachtungsweise (VDA-QMC 2008) werden auch Fehlerfolgen zu Ursachen, die lediglich in der Kausalkette die Verbindung zwischen der sogenannten Top-Folge und der Wurzel-Ursache darstellen. Zur mathematischen Vereinfachung wird im Modell von Haffner nur die Grundursachen in einer Fehlerlinie betrachtet.

3. Wirkungsebene

In der klassischen FMEA besteht der Zusammenhang zwischen Grundursache und Merkmal aus einer Kette beliebig vieler Tripel aus Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursache. Dabei erfolgt für jedes Kettenglied die Bewertung nach den bekannten Kennzahlen. In der Wirkungsebene wird jede Kette als ein Fehler, in Analogie zur klassischen FMEA, behandelt. Dadurch werden alle Tripel einer Fehlerlinie in ein einziges Tripel aus Grundursache, Fehler und Fehlerfolge zusammengefasst.

Fehlerfolge	Fehler			Fehlerursache
Merkmalsebene	Knotenebene Wirkungsebene			Ursachenebene
Merkmal	Fehler	Fehler	Fehler	Ursache

Abbildung 15 Kombination der Fehlertripel (Haffner 2005)

4. Knotenebene

Die praktische Anwendung zeigt jedoch, dass sich innerhalb der oben beschriebenen Wirkungsebenen zusätzlich Ereignisse befinden können, die für eine Fehlerbewertung signifikant sind. Die Einführung der Knotenebene dient somit zur Veranschaulichung des Prozesses und stellt eine Erleichterung in der Bestimmung der notwendigen Kennzahlen dar.

Unter der Knotenebene sind signifikante Punkte in der Wirkungsebene zu verstehen, die sowohl Auswirkungen auf die Bedeutung (B) als auch auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) haben.

2.3.2 Integration von Abweichungskosten in die Prozesskostenrechnung

Das in (Schmidt 1996) entwickelte Modell zur Berechnung der tatsächlichen Fehlerkosten durch Berücksichtigung der anteiligen Fertigungs- und Materialkosten je Prozessschritt kann für Montagetätigkeiten dahingehend vereinfacht werden, dass für die Fertigungskosten nur die anteiligen Personalkosten berücksichtigt werden – die dadurch bedingte Abweichung ist für rein manuelle Arbeitsplätze gering (Heinlein 2006). Die Berechnung des Wertschöpfungsverlustes kann in guter Näherung durch die Annahme eines linearen Verlaufes über die Prozessschritte bzw. Arbeitsstationen erfolgen.

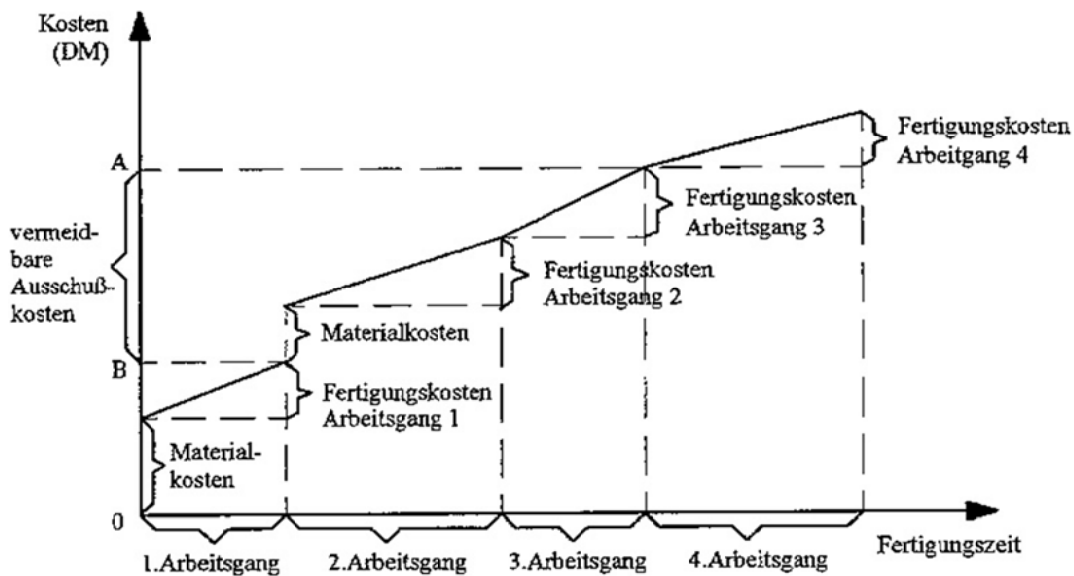


Abbildung 16 Fehlerkosten in der Fertigung (Schmidt 1996)

2.4 Defizite der bekannten Prozessplanungsmethoden im Hinblick auf eine gesamtheitliche Optimierung

2.4.1 Methoden zur Zeitoptimierung

Wie Abschnitt 2.2.1.2 dargestellt, hat die MTM das Ziel, Montageabläufe zeitoptimal, d.h. mit minimiertem Zeitbedarf, zu gestalten. Gesucht wird nach der bestmöglichen Taktung des Produktionsprozesses ohne Berücksichtigung von stochastisch auftretenden Fehlern der Werker. Der Planer muss von optimalen Randbedingungen ausgehen, berücksichtigt also in der Regel keine zufälligen Fehler der Werker und den zur Behebung dieser Fehler notwendigen Zeitaufwand. Die realen Produktionszahlen werden so immer hinter den Planzahlen zurückbleiben, ohne dass die Möglichkeit besteht, präventive Maßnahmen zu ergreifen.

2.4.2 Methoden zur Qualitätsoptimierung

Bei der FMEA handelt es sich, wie in Abschnitt 2.2.2.3 beschrieben, um eine standardisierte analytische Methode zur systematischen Fehler-Ursachen-Analyse. Diese Risiken bei den analysierten Produkten und Prozessen lassen sich in messbare Größen überführen.

Daneben hat diese Methode auch gewisse Defizite, die sich auch im Anwendungsfall des Montageprozesses zeigen:

- Der lange Zeitdauer der Durchführung, der nicht zuletzt aus der Notwendigkeit entsteht, dass das FMEA-Team zu gemeinsamen Terminen für die Sitzungen finden muss.
- Die hohen Kosten der Durchführung, die aus dem hohen Zeitaufwand und der damit verbundenen Inanspruchnahme der im FMEA-Team vertretenen beteiligten Personen der verschiedenen betroffenen Bereiche resultieren.
- Schwächen bei typischen, stark voneinander isolierten Prozessschritten der Montage, hier sind meist viele Einzeltätigkeiten

durchzuführen, welche sich auf mehrere Teile gleichzeitig beziehen und darüber hinaus auch noch parallel ablaufen.

- Keine quantitativ monetäre Bewertung der Fehlerfolgekosten.

Die FMEA ist eine Methode, mit der komplexe Produkte bzw. Prozesse präventiv gut aus Qualitätssicht abgesichert werden können – darin begründet sich jedoch gleichzeitig die Schwäche bei technologisch einfachen Prozessen (wie sie Montageprozesse durch ihren hohen Anteil an Füge-Vorgängen repräsentieren). Die Ansätze den FMEA-Aufwand zu reduzieren, indem nur völlig neue Prozesse oder Technologien intensiv analysiert werden, wie vorgeschaltete Risikofilter oder der Einsatz von „Basis“-FMEAs⁶ zur Vermeidung einer Doppel-Analyse, reflektieren die oben genannten Schwächen.

2.4.3 Methoden zur Kostenoptimierung

Die Prozesskostenbetrachtung ist zwar in der Lage, die entstehenden Kosten (Konformitätskosten, mit Erweiterungen auch Abweichungskosten) einzelnen Prozessschritten zuzuordnen, bietet aber bei der gesuchten, holistischen Optimierung wenig bis gar keine Unterstützung. Die Ursachen dafür sind:

- Keine direkte Betrachtung zeitlichen und räumlichen Trennung von Fehlerauftreten und –Entdeckung. Es besteht sogar die Möglichkeit, dass eine Fehlerentdeckung in einem späteren Prozessschritt und die sich daraus ergebenden Aktionen (z.B. Nacharbeit, Teiletausch,

⁶ Die Technik der „Basis“-FMEAs wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung entwickelt. Zur Erstellung einer Basis-FMEA werden die grundsätzlichen und optionalen Elemente eines Produkts oder Prozesses regulär einer Fehler-Möglichkeit- und Einflussanalyse unterzogen und einschließlich aller Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen und Bewertungen dokumentiert. Zur Bewertung eines neuen Produkts oder Prozesses müssen nur die Bewertungen auf der obersten Ebene neu erstellt werden, und die Fehler-Fehlerfolge-Fehlerursache-Beziehungen angepasst werden.

Verschrottung, Nachprüfung) diesem Schritt zugeordnet werden, und Maßnahmen auslösen, die in die falsche Richtung führen.

- Durch die Vorgehensweise können immer nur Schätzungen bzw. Projektionen der Fehlerkosten der Vergangenheit auf zukünftige geplante Prozesse verwendet werden. Dabei bleiben im Allgemeinen technologische und organisatorische Verbesserungen unberücksichtigt, da diese erst Auswirkungen in den erfassten Kosten bewirken müssen, um in die Berechnung einzugehen. Aus diesem Grund können Kostenrechnungssysteme nur wenig Unterstützung bei strategischen Entscheidungen bieten.
- Die Kostenoptimierungsmethoden haben generell das Problem, dass die Zuordnung der Kosten keine direkten Aussagen zur Effektivität und zur Effizienz der betrachteten Prozesse zulässt.

Ein Hinweis auf die erkannten Defizite in diesem Bereich sind der verstärkte Einsatz von ergänzenden Methoden wie der OEE (Overall Equipment Efficiency), die – basierend auf den maximalen Performancezahlen eines Prozesses oder einer Produktionsanlage – Aussagen zum Verhältnis zwischen produzierten und maximal produzierbaren Stückzahlen liefert.



Abbildung 17 OEE (Steinhardt 2006)

2.4.4 Zusammenfassung der Defizite

Zur abschließenden Bewertung der betrachteten Methoden wird das in Kapitel 1 kurz beschriebene „Magische Dreieck“ aus Kosten, Zeit und Qualität nochmals betrachtet, indem für das Spannungsfeld exemplarisch Kennzahlen herangezogen und für die beschriebenen Methoden bewertet werden. Tabelle 1 zeigt die dafür gewählten Kennzahlen, Tabelle 2 den Bewertungskatalog für die Kennzahlen.

KPI Zeit	KPI Qualität	KPI Kosten
Planungsdauer	Anzahl Fehler intern / extern	Produktionskostensenkung
Durchlaufzeitverbesserung	Veränderung Fehlerzahl	Planungskosten

Tabelle 1 Kennzahlen für die Methodenbewertung

Kennzahl	Bewertung
Planungsdauer	1 = große Zeitdauer, 5 = geringe Zeitdauer
Durchlaufzeitverbesserung	1 = keine Reduzierung Durchlaufzeit, 5 = starke Reduzierung Durchlaufzeit
Anzahl Fehler intern / extern	1 = hohe Fehlerzahl, 5 = niedrige Fehlerzahl
Veränderung Fehlerzahl	1 = keine Veränderung, 5 = starke Reduzierung
Produktionskostensenkung	1 = keine Senkung, 5 = hohe Senkung
Planungskosten	1 = hohe Planungskosten, 5 = niedrige Planungskosten (Human-Ressourcen)

Tabelle 2 Bewertungskatalog der Kennzahlen

	Prozess-kostenrechnung	FMEA	Wertstromdesign	MTM
Planungsdauer	1	1	3	1
Durchlaufzeitverbesserung	1	1	5	3
Anzahl Fehler intern / extern	1	4	2	1
Veränderung Fehlerzahl	1	4	2	1
Produktionskostensenkung	4	3	3	3
Planungskosten	1	1	2	1

Tabelle 3 Ergebnisse der Methodenbetrachtung

Die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse bedürfen folgender Kommentare:

Die Planungsdauer muss für die Prozesskostenrechnung (PKR), die FMEA und für MTM als hoch (1) eingeschätzt werden, für die PKR wegen des hohen Aufwands zur Ermittlung und Zuordnung der Kosten, für die MTM wegen der aufwändigen Zerlegung der Arbeitsabläufe. Die FMEA benötigt als Team-Methode grundsätzlich mehr Personal-Ressourcen, wohingegen das Wertstromdesign (WSD) als „schlanke“ Methode deutlich weniger Personal-Ressourcen bindet.

Die erreichbare Durchlaufzeitverbesserung – und damit mögliche Verringerung der Produktionskosten – ist eines der Hauptziele des WSD, deshalb die sehr gute Bewertung (5). MTM verfolgt dieses Ziel durch die Analyse und Optimierung der notwendigen Bewegungen im Arbeitsablauf, achtet jedoch nicht wie das WSD auf mögliche Formen der Verschwendung und deren Ursachen, da keine Fehlhandlungen oder Behinderungen des Werkers (insbesondere in der Verkettung von Arbeitsplätzen) betrachtet werden. PKR und FMEA können zur Verbesserung der Durchlaufzeit keinen oder nur einen sehr kleinen Beitrag leisten.

Für die Ermittlung der Anzahl der Fehler – interne wie externe (beim Kunden auftretende) – und die Reduzierung von Fehlerzahlen ist die FMEA die beste Methode, eine sehr gute Bewertung (5) ist jedoch nicht möglich, da – methodisch bedingt – in den Prozess gelangende Fehler aus Vorprozessen nicht berücksichtigt werden. Die in dieser Arbeit betrachteten manuellen Montageprozesse verbauen, wie in Absatz 2.1 gezeigt, jedoch einen hohen Anteil an zugekauften Teilen. Das WSD kann durch die Vorgehensweise des „Beobachten“ sehr gut systematische Fehler erkennen, die durch den Menschen induzierten, stochastischen Fehler jedoch nicht. MTM ist, wie oben beschreiben, auf die Planung von fehlerfreien Prozessen ausgerichtet, die PKR berücksichtigt bestenfalls die möglichen Fehler-

kosten, ohne dabei die Fehler selbst oder Möglichkeiten zur Fehlervermeidung zu analysieren.

Hinsichtlich der Produktionskostensenkung sind alle Methoden als durchschnittlich zu bewerten mit der Ausnahme der PKR, die im Gegensatz zu FMEA, WSD und MTM die Produktionskosten direkt betrachtet.

In Abbildung 18 sind diese Ergebnisse verdichtet dargestellt. Die in Kapitel 1 formulierten Anforderungen können mit keiner der untersuchten Methoden komplett erfüllt werden.

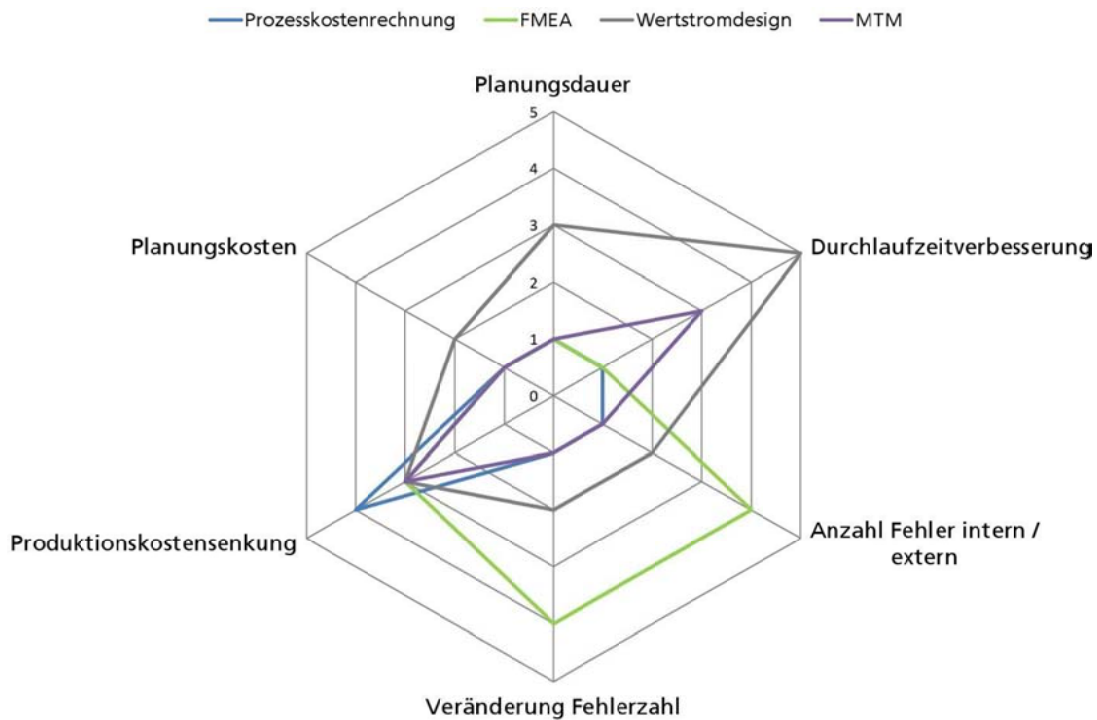


Abbildung 18 Erfüllung der Anforderungen durch existierende Methoden

3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Die Betrachtung der Vor- und Nachteile der einzelnen (charakteristischen) Methoden zur Optimierung von Prozessen nach Zeit, Kosten und Qualität führen zur konkreten Darstellung der zu behebenden Defizite:

Zeitaufnahmen nach REFA funktionieren nur retrospektiv, d.h. der zu optimierende Prozess muss schon existieren. Die bessere Alternative, die Methoden vorbestimmter Zeiten (MTM-X, MOST), berücksichtigen einen idealen Prozess. Diese Vorgehensweise ist der Komplexität der Tätigkeiten angepasst, aber nicht den menschlichen Einschränkungen wie Ermüdung oder Ablenkbarkeit.

Die Methoden zur Kostenoptimierung sind zwar in der Lage, die Gemeinkosten besser den Prozessen und Produkten zuzuordnen, haben aber Schwächen bei der Bewertung von Konformitäts- und Abweichungskosten.

Die Qualitätsmethoden legen den Schwerpunkt auf wenig realistische Ziele wie die Forderung nach der Produktion ohne jeglichen Fehler, oder setzen – für den Montageprozess – falsche methodische Vorgaben wie das Ignorieren von Fehlern aus Vorprozessen.

Es ist, basierend auf den positiven Elementen der betrachteten Methoden wie z.B.

- Analyse des Prozesses in „Top-Down“-Richtung (Prozesskostenrechnung, MTM, FMEA)
- Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Fehler-Auftritts und -Entdeckung (FMEA)
- Klare Zuordnung von Kosten zu Prozessschritten (Prozesskostenrechnung)

eine Methode zu entwickeln,

- die eine klare, verständliche Darstellung des Montageprozesses bietet,

- die – unter Zuhilfenahme des Erfahrungswissens der Werker – eine schnelle Definition und Bewertung der Prozess-Risiken erlaubt,
- die auf einfache Art eine Berechnung der Abweichungskosten und Konformitätskosten erlaubt,
- die Aussagen zur Effizienz (wie viele Einheiten können produziert werden) und zur Effektivität (wie viele Einheiten können ohne jede Prozessstörung produziert werden) zu mindestens näherungsweise liefern kann und
- so einfach ist, dass keine explizite Schulung notwendig ist.

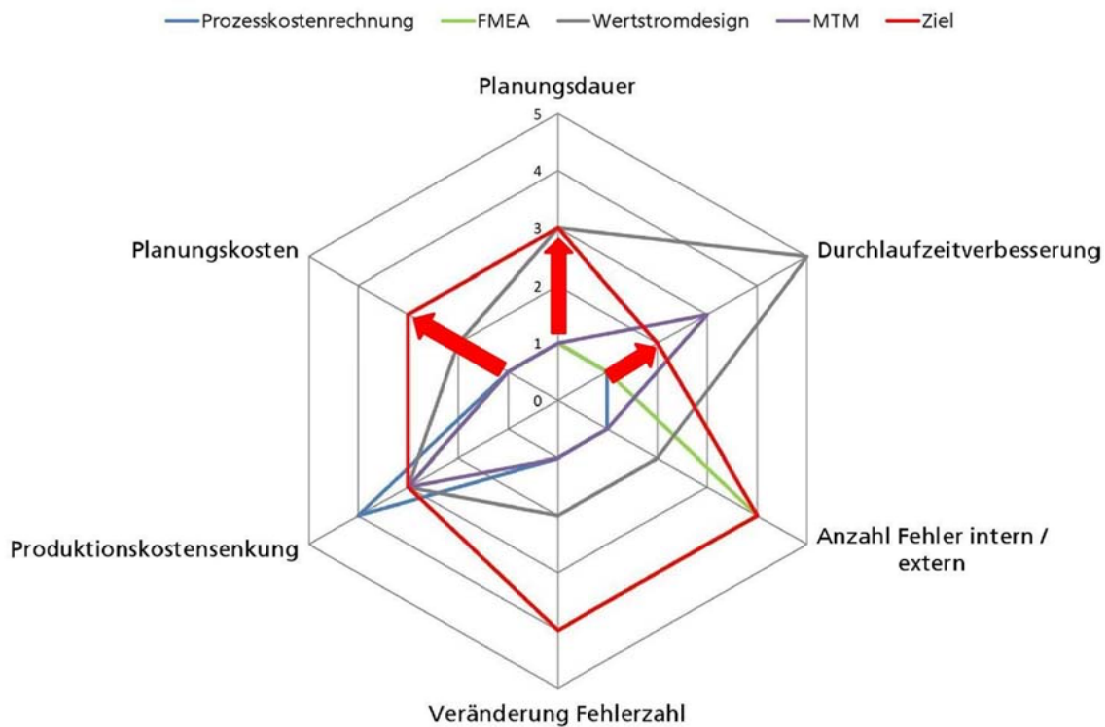


Abbildung 19 Zielvorgabe für die neue Methode

Abbildung 19 zeigt die Vorgabe für die neue Methode im Kontext der analysierten Methoden.

4 Entwicklung einer Methode zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage

4.1 Die Grundlagen der Methode

Die in Kapitel 1 beschriebenen Methoden verfolgen den klassischen Ansatz der Wissenschaft, nämlich vom „Großen ins Kleine“, d.h. der Betrachtungsgegenstand – hier der zu planenden Montageprozess – wird in seine kleineren Einheiten zerlegt. Dies ist der Fall bei der Prozesskostenrechnung – hier wird der Prozess klassisch top-down in seine Prozessstruktur so lange unterteilt, bis die Kosten zugewiesen werden können. Etwas sehr ähnliches geschieht bei der FMEA, bei der in der ersten Phase die Struktur des Systems bzw. des Prozesses top-down analysiert wird. Die zeitorientierte Planung z.B. nach MTM zerlegt den Prozess ebenfalls in kleinere Elemente, hier jedoch bis zu den grundsätzlichen Elementen der Bewegungen der Werker.

Die moderne Interpretation der Prozess-FMEA sieht für die Struktur eine Reduktion auf die wertschöpfenden Prozessschritte vor – dies erscheint als guter Kompromiss zwischen den Ansätzen, bis auf Einzelbewegungen zu betrachten (wie bei MTM) beziehungsweise bei der Montagestation (wie bei der Prozesskostenrechnung) die Betrachtungsgrenze zu ziehen.

Erstes Zwischenergebnis: *Der Prozess wird bis auf die wertschöpfenden Schritte in Einzelschritte zerlegt; geplante Prüfungen werden in der richtigen zeitlichen Reihenfolge eingefügt.*

Der Ansatz der Prozess-FMEA, nur wertschöpfende Schritte aufzunehmen (Schloske 2010), muss jedoch hinterfragt werden, da z.B. prozessintegrierte Prüfungen als nicht wertschöpfende Tätigkeit eingestuft werden müssen. Diese Prüfungen benötigen Prozesszeit und verursachen hohe Kosten. Die hohen Kosten entstehen durch den Einsatz von anspruchsvollen Techniken wie automatisierten Sichtprüfungen oder Laserscanner und durch die

Notwendigkeit der Integration in das elektronische Steuerungssystem der Montagelinie („Bandverknüpfung“).

Die Prozess-FMEA stellt durch die Trennung der Analyse-Phase in Struktur, Funktion und Fehlfunktion sicher, dass nicht nur aktuelle im Fokus befindliche Probleme, sondern alle potentiell möglichen Fehler betrachtet werden.

Durch diese Auftrennung ist eine objektive Bewertung des Risikopotentials möglich. Ein Problem der FMEA-Systematik ist die geforderte Ausblendung von Fehlern, die von Vor-Prozessen eingebracht werden – dies gilt bei der Betrachtung von Montageprozessen dann auch für die große Menge an zugekauften Teilen, die heute bei Automobilherstellern bis zu 80% der Gesamtmenge der verbauten Teile ausmachen kann (VDA 2008). Ein anderes Problem der Prozess-FMEA im Zusammenhang mit den Montageprozessen ist die methoden-immanente Eignung zur Analyse von komplexen Ursache-Wirkung-Zusammenhängen, die bei näherer Betrachtung zu einem Konflikt mit den einfachen Ursache-Wirkung-Zusammenhängen bei manuellen Fügeprozessen führt. Die manuellen Fügeprozesse bieten nur ein geringes Spektrum an möglichen Fehlerursachen, da im Schwerpunkt stochastische Fehler betrachtet werden müssen, wie z.B. „vergessen“ oder „vertauscht“, die Ursache darin ist – vereinfacht – immer der Werker⁷.

⁷ Ein – bisher nicht systematisch ausgewerteter – Nachweis dafür ist die häufig in Prozess-FMEAs zu findende Vermeidungsmaßnahme „Werker-Schulung“ bzw. „Werker-Unterweisung“ (siehe dazu auch die Literaturverweise in Abschnitt 2.1).

Zweites Zwischenergebnis: *Die Fehlerentstehung wird anhand der Funktion des Prozessschritts betrachtet, d.h. Prozessschritt für Prozessschritt wird die Funktion und mögliche Fehlfunktionen betrachtet und bewertet, d.h. die Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerentstehung und Fehlerentdeckung werden ermittelt. Fehler von in den Prozess kommenden Teilen werden nicht ignoriert, sondern ebenso als Störung des Prozessablaufs betrachtet. Fehlerursachen werden nicht untersucht, sondern als vom Werker verursacht angenommen. Aus der Prozesskostenrechnung wird übernommen, dass – zur Vereinfachung auch geschätzt – Abweichungs- und Opportunitätskosten erfasst und den Prozessschritten zugeordnet werden. Die Wertschöpfungsverluste werden anhand eines linearen Verlaufes in der Prozesskette als Delta zwischen Fehlerauftritt und Fehlerentdeckung ermittelt.*

Der Ansatz von MTM, durch Top-Down-Analyse zu Einzelelementen zu kommen, die bekannt und bewertet sind, und diese dann wieder zu einer Aussage für das Gesamtsystem aufzusummieren, wird auf die betrachteten Fehler angewendet, d.h. das Gesamtbild des Prozesses wird durch Aufsummieren der Elemente (hier der Fehler) ermittelt.

Drittes Zwischenergebnis: *Die holistische Betrachtung des Prozesses erfolgt durch Konvertierung der Fehlerprognosen in Kosten, dazu werden die Abweichungs- und Konformitätskosten an der Stelle ihrer Entstehung erfasst und mit den absoluten Fehlerzahlen zu Gesamtkosten pro Jahr verarbeitet. Dadurch wird die Gegenüberstellung der Abweichungskosten mit den Konformitätskosten möglich.*

4.2 Die Elemente der neuen Methode

4.2.1 Darstellung des Prozessablaufes

Die in Abschnitt 4.1 beschriebene Top-Down-Zerlegung des Prozessablaufs wird in horizontaler Richtung als Einzelschritte realisiert. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben werden die Einzelschritte als die Funktionen (im FMEA-Sinn) des Montageablaufs aufgenommen - genauer als Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte. Die Formulierung dieser vom Prozess erwarteten Funktionen erfolgt z.B. als „Verschlusschraube heften“ und nicht als „Verschlusschraube geheftet“, um eine bessere Verständlichkeit zu erreichen. Mehrere dieser Prozessschritte können einem Arbeitsplatz zugeordnet werden. Die vom Planer üblicherweise wegen der schrittweisen Abarbeitung in der Tabellenkalkulation gewählte Darstellung des Prozessablaufes in vertikaler Richtung wird in die horizontale Richtung transponiert (Abbildung 20). Dies erleichtert durch die Analogie mit den gängigen Darstellungsformen des Zeitstrahls die Wahrnehmung des Prozessablaufes als zeitlichen Ablauf. In der genannten Abbildung stehen die Bezeichnungen S1, S2 und S3 für Arbeitsplätze, T1 und T2 für in die Linie integrierte Prüfeinrichtungen.

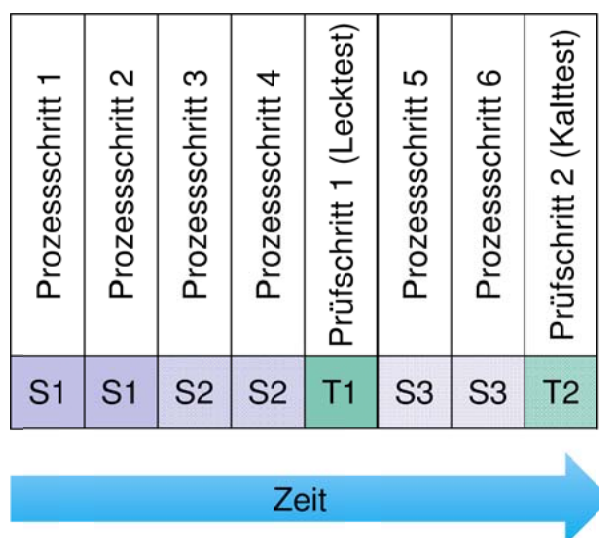


Abbildung 20 Darstellung des Prozessablaufes

4.2.2 Erfassung von Konformitätskosten

Die Kosten für bestehende Prüfeinrichtungen sind im Allgemeinen bekannt und werden den entsprechenden Stationen wie in Abbildung 21 gezeigt zugeordnet. Falls hier die Kosten als Fix- und Proportionalkosten erfasst werden sollen, kann das durch weitere Zeilen realisiert werden.

Die Prüfeinrichtungen, die hohe Investitionen erfordern, wie automatische Teststationen für kritische Produktmerkmale oder automatische Funktionstests sollten zum Zeitpunkt der Montageprozessplanung schon kalkuliert worden sein. Hier kann ersatzweise auf die Daten von bestehenden Anlagen zurückgegriffen werden. Bei den einfacheren Prüfeinrichtungen genügt in der Regel eine grobe Schätzung der Investitionskosten.

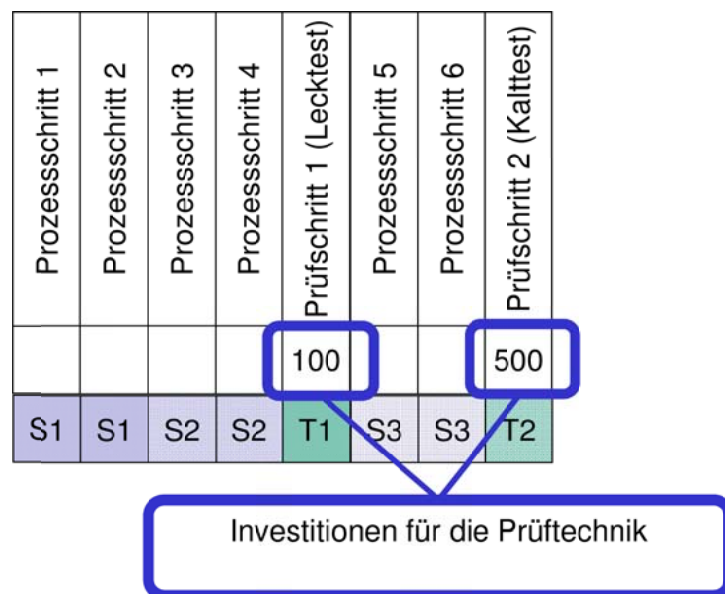


Abbildung 21 Zuordnung der Konformitätskosten

4.2.3 Zuordnung der Fehler zu den Prozessschritten

Bei der Analyse soll auf den konkreten Prozessschritt fokussiert werden, dies ist durch die Zeitstrahlanalogie auch ohne vorheriges Methodentraining leicht möglich. Die dadurch leichtere Extrapolation des Erfahrungswissens der Werker soll eine schnelle und effektive Analyse des Prozesses ermöglichen.

Die Fehler werden nicht wie bei der FMEA als Fehlfunktionen formuliert, sondern in Form eines zweistufigen Fehlerkatalogs als Kombination von Fehlerort und Fehlerart erfasst. Die Menge der möglichen Fehlerarten ist beschränkt, sie besteht im Wesentlichen aus

$$M_{\text{Fehlerarten}} = \{\text{vergessen, vertauscht, verdreht gefügt, doppelt gefügt, beschädigt}\}.$$

Durch die kleine Menge an möglichen Fehlerarten und dem in der Situation klaren Bezug auf eine Komponente (=Fehlerort) ist die Formulierung des Fehlers sehr leicht möglich. Die Einbindung des Fehlerorts ermöglicht – gerade auch im Hinblick auf die große Zahl an Kaufteilfehlern – eine leichtere Analyse bezüglich spezifischer Komponenten. Die Fehler spannen eine zweite Achse nach unten auf, dadurch kann im Schnittpunkt von Prozessschritt und Fehler eine eindeutige Zuordnung der Bewertung erreicht werden.

		Prozessschritt 1	Prozessschritt 2	Prozessschritt 3	Prozessschritt 4
Teil	Fehler	S1	S2	S2	S2
Teil 1	vergessen				
Teil 1	vertauscht				
Teil 2	verdreht				

Abbildung 22 Zuordnung der Fehler zu den Prozessschritten

Die sich ergebende Matrix, deren Elemente jeweils einen Prozessschritt und einen Fehler zuordnen, soll im Folgenden Fehler-Prozess-Matrix (kurz FPM) bezeichnet werden.

4.2.4 Bewertung der möglichen Fehler

Die neue Methode soll das Erfahrungswissen der Werker nutzen, da diese, im Gegensatz zu den Planern, die stochastisch auftretenden Fehler der Mitarbeiter aus eigener Erfahrung kennen und für ähnliche neue Montagesituationen extrapolieren können. Dies wurde als Annahme postuliert, der Beweis dafür ist noch zu führen.

Erfahrungen aus anderen Bereichen zeigen, dass hinreichend erfahrene Experten in der Praxis durchaus brauchbare Ergebnisse liefern können und das insbesondere dann,

wenn nicht nur ein Experte zu seiner Meinung befragt wird, sondern etwa drei bis fünf Spezialisten mit möglichst unterschiedlichen Hintergründen ihre Schätzungen abgeben und diskutieren können. (Hummel 2011)

Um mit möglichst einfacher Fragetechnik auf dieses Erfahrungswissen zurückgreifen zu können, ist ein neuer Bewertungskatalog notwendig, der – anders als die Vorschläge aus (VDA-QMC) – nicht auf Fehlerraten in Form von parts per million (defekte Teile pro Million Teile, ppm) basiert, sondern mit typischen Zeiträumen der menschlichen Erinnerung operiert.

AUF TRETEN		
sehr hoch	jede Baugruppe	10
sehr hoch	jede zweite Baugruppe	9
hoch	einmal/ Stunde	8
hoch	einmal/ Schicht	7
mäßig	einmal/ Tag	6
mäßig	einmal/ Woche	5
mäßig	einmal/ Monat	4
gering	einmal/ Quartal	3
gering	einmal/ Jahr	2
sehr gering	über 1 Jahr her	1

Tabelle 4 Bewertungskatalog für den Fehlerauftritt

In Tabelle 4 ist ein exemplarischer Bewertungskatalog dargestellt. Die beiden Stufen 9 und 10, die nicht in zeitlicher Abhängigkeit stehen, werden für den Fall eines systematischen (Planungs-)Fehlers benötigt. Für kleine Stückzahlen der Jahresproduktion muss der Katalog angepasst werden. Falls die Stufen 9 und 10 verwendet werden sollen, gilt die Notwendigkeit der Anpassung bei Werten von weniger als 10000 produzierten Einheiten pro Jahr, ansonsten ist eine Anpassung des Bewertungskatalogs bei Werten von weniger als 4000 bzw. 2000 produzierten Einheiten pro Jahr notwendig. Diese Anpassung ist notwendig, weil die Stufe 8 (einmal/Stunde) pro Schicht zu ca. 2000 fehlerhaften Einheiten pro Jahr führen würde.

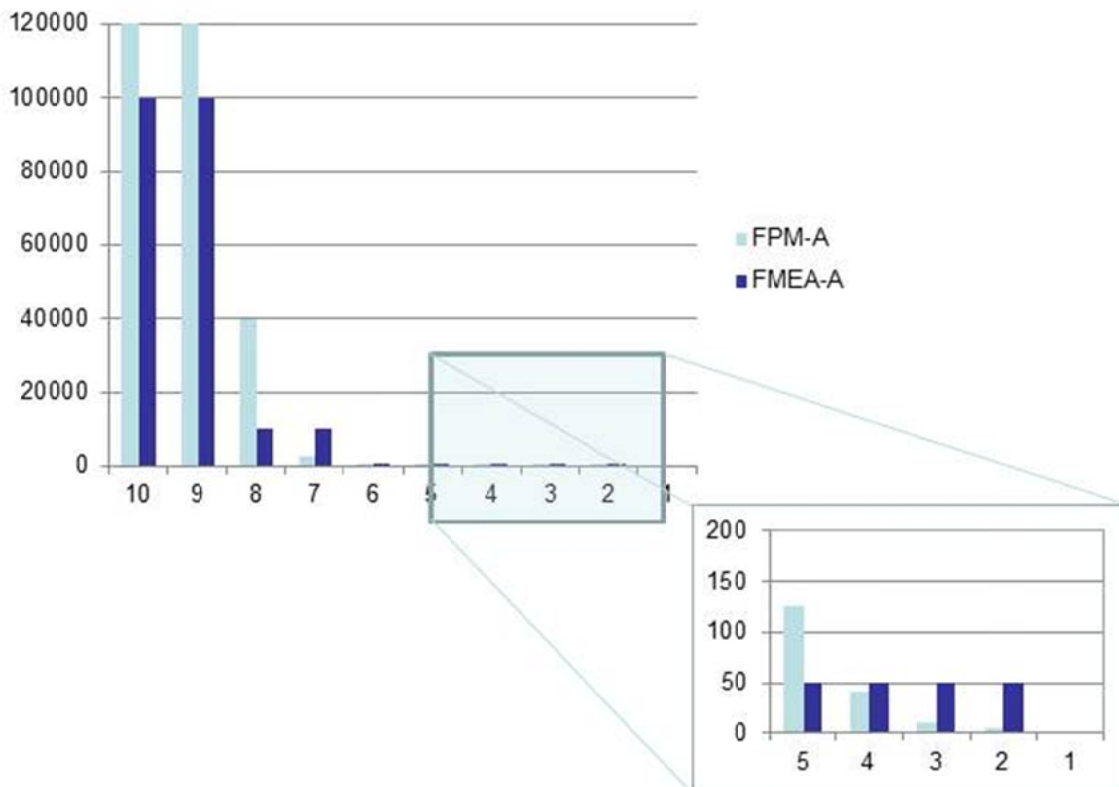


Abbildung 23 Unterschiede der FMEA- und FPM-Kataloge (Auftreten Fehler)

In Abbildung 23 sind die Unterschiede des neuen Katalogs im Vergleich zu den in (VDA-QMC) vorgeschlagenen FMEA-Katalogen zu sehen – deutlich

ist die differenziertere Betrachtung der Fehlerzahlen zu erkennen, insbesondere für kleinere Bewertungszahlen.⁸

Durch die Nutzung eines entsprechend modifizierten Katalogs – wie in Tabelle 5 dargestellt – für die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers wird es möglich, auch „zufällige“ Entdeckungen eines Fehlers in späteren Prozessschritten aufzunehmen. Die Beobachtung zahlreicher Montageprozesse zeigt, dass eine nicht zu vernachlässigende Zahl von Fehlern vorhergehender Montageschritte entdeckt wird, weil erfahrene Werker die veränderten Muster wahrnehmen bzw. wegen fehlender Voraussetzungen Ihre Arbeitsgänge nicht ausführen oder vollenden können. Durch die Auswertung von Nacharbeitsaufzeichnungen (Schneider 2010) wird diese Annahme hinreichend bestätigt. Die Bewertungsstufen 6 bis 9 sind dafür vorgesehen und korrespondieren gut mit dem Erfahrungswissen der Werker (z.B. „jeder zweite Fehler wird entdeckt“ oder „ein Fehler von vier wird entdeckt“).

ENTDECKUNG		
gar nicht	0,0%	10
sehr niedrig	25,0%	9
niedrig	50,0%	8
niedrig	75,0%	7
mäßig	90,0%	6
mäßig	95,0%	5
mäßig	97,5%	4
hoch	99,0%	3
sehr hoch	99,5%	2
sicher	100,0%	1

Tabelle 5 Bewertungskatalog für die Fehlerentdeckung

⁸ Dies stellt – aus Sicht der FMEA – keinen Fehler dar, sondern folgt den aus Sicht des Autors guten und praktikablen Vorschlägen des VDA-QMC, weniger Bewertungsstufen zu verwenden.

Neben diesen zufälligen Entdeckungen ist es durch diesen Katalog möglich, Entdeckungen von Fehlern als Nebeneffekt in Prüfstationen zu erfassen.

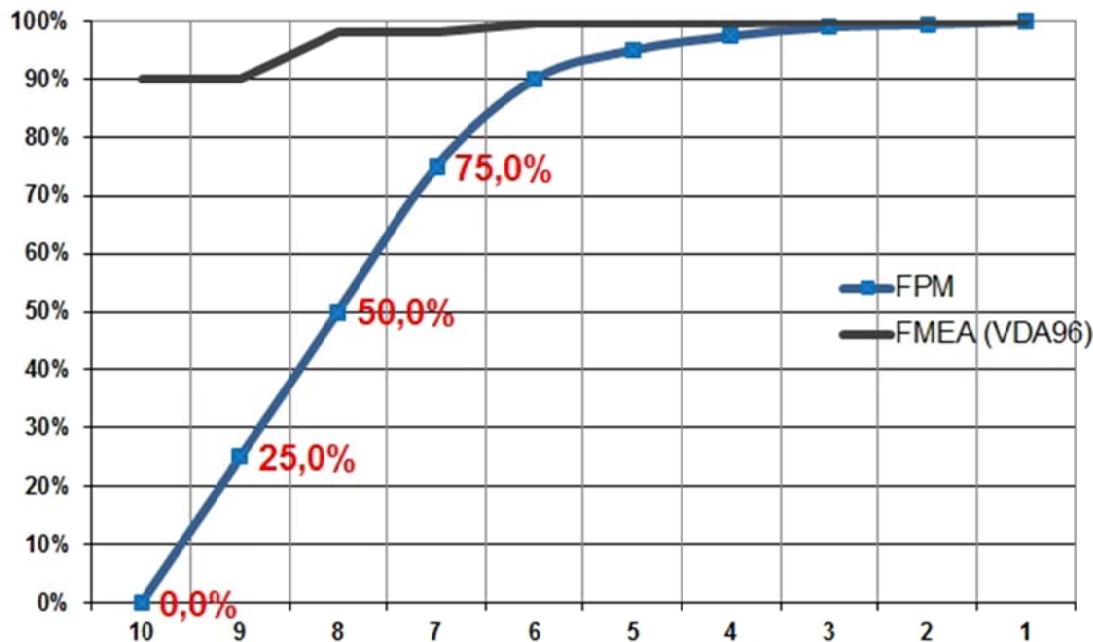


Abbildung 24 Unterschiede der Bewertungskataloge für die Fehlerentdeckung

Durch die – im Vergleich mit der FMEA – sehr niedrigen Werte für die Entdeckungswahrscheinlichkeiten der Bewertungsstufen 6 bis 9 (Abbildung 24) ergibt sich die Möglichkeit, die oben beschriebenen zufälligen Entdeckungen in die Gesamtbewertung mit einzubeziehen. Im Unterschied zur FMEA, bei der als gängige Anwendungspraxis die Verwendung eines Katalogs mit wenigen Stufen erfolgt (VDA-QMC, S.122–124), ist durch die weitere Spreizung eine erhöhte Granularität der Bewertung möglich⁹.

⁹ Die Reduzierung auf eine geringere Anzahl Stufen ist zur Erleichterung der FMEA-Bewertung sehr sinnvoll. Bei einer geraden Anzahl Bewertungsstufen werden die Teilnehmer „gezwungen“, sich grundsätzlich in Richtung „besser“ oder „schlechter“ zu entscheiden.

4.2.5 Kombination von Fehlerentstehung und Fehlerentdeckung

Ein wesentlicher Aspekt der neuen Methode soll die Transparenz des Fehlergeschehens sein. Dies wird erreicht durch die Darstellung von Auftreten und Entdeckung eines Fehlers in einer Zeile einer Matrix.

		Prozess schritt 1	Prozess schritt 2	Prozess schritt 3	Prozess schritt 4	Prüfschritt 1 (Lecktest)	Prozess schritt 5	Prozess schritt 6	Prüfschritt 2 (Kalttest)
Teil	Fehler	S1	S2	S2	T1	S3	S3		
Teil 1	vergessen								
Teil 1	vertauscht		3					1	
Teil 2	verdreht								

Abbildung 25 Fehlerauftritt und Fehlerentdeckung als Zeitstrahl

Die Darstellung der Zusammenhänge – wie in Abbildung 25 gezeigt – ermöglicht die sofortige Erfassung der Situation im Prozess:

- Werden alle Fehler entdeckt, bevor sie den Prozess verlassen können?
- Wie viele Prozessschritte liegen zwischen Auftreten und Entdeckung?
- Werden Fehler an mehreren Stellen im Folgeprozess entdeckt?

Der hier visualisierte Zusammenhang zwischen Fehlerentstehung und Fehlerentdeckung dient als erste Näherung für die Kostenbewertung – je weiter entfernt Auftreten und Entdeckung („Entdeckungsdistanz“) voneinander sind, desto höher wird der Verlust an Wertschöpfung sein.

4.2.6 Modell zur Erfassung von Abweichungskosten

Um den gewünschten Vergleich von Konformitäts- und Abweichungskosten vornehmen zu können, muss eine integrierte Erfassung von Aussagen zu Nacharbeitsaufwänden und Ausschusskosten erfolgen. Dies erfolgt sinnvollerweise durch Analyse des jeweiligen Einzelfalls. Durch die Kombination dieser Kosten mit der zu erwartenden Anzahl fehlerhafter Einheiten pro Jahr können realistische Werte für die zu erwartenden Kosten berechnet werden. Dadurch kann die Betrachtung der Kosten für Nacharbeit (hier Beachtung der Opportunitätskosten!), Ausschuss und Gewährleistung auf Jahresbasis erfolgen.

Die Nutzung des Erfahrungswissens der Werker liefert eine Aussage zu den entstehenden Aufwänden zur Behebung eines Fehlers: Der Werker beurteilt für den Fehler die notwendigen Demontage- und Montageschritte. In Abbildung 26 ist dieser Sachverhalt graphisch dargestellt. Der auftretende Wertschöpfungsverlust entspricht bei den oben getroffenen Annahmen bezüglich der Linearität der Wertschöpfung 50% des vom Werker geschätzten Aufwandes zur Fehlerbehebung.

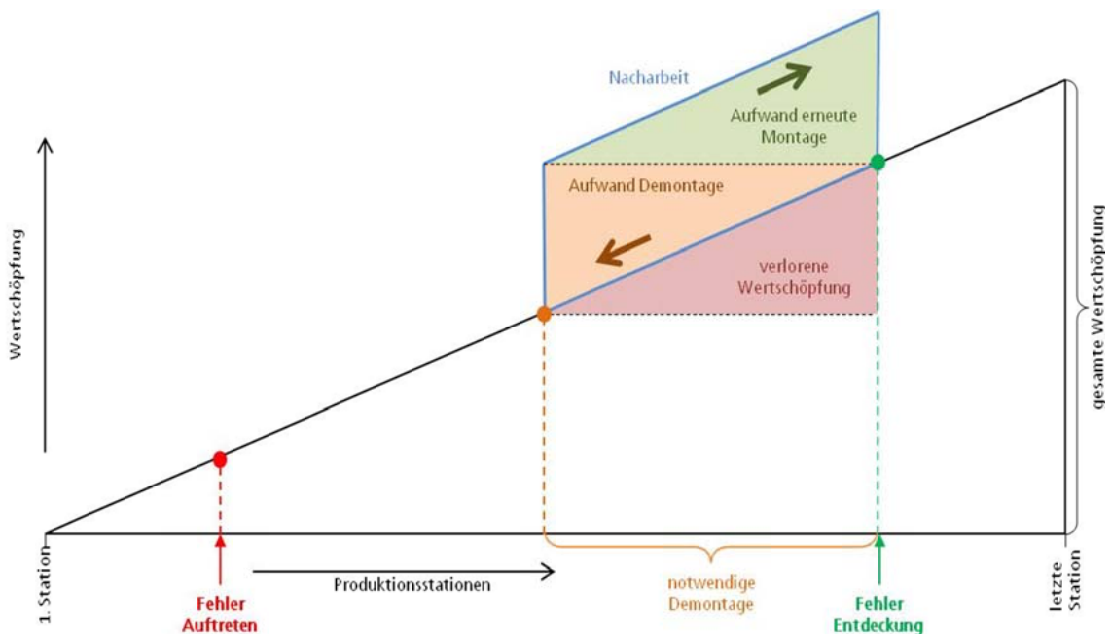


Abbildung 26 Darstellung des Wertschöpfungsverlustes im Fehlerfall

Spezielle Szenarien, wie eine Fließfertigung, erfordern eine Anpassung der Vorgehensweise. Diese Anpassung ist mit geringem Zusatzaufwand möglich: Die besondere Eigenart der Fließfertigung erfordert, dass bei der Betrachtung des Wertschöpfungsverlustes zusätzlich unterschieden werden muss, ob der Fehler in der Linie mit Anhalten des Bandes (dabei ist der Produktivitätsverlust zusätzlich zu betrachten, der der Anhaltezeit mal der Anzahl der Werker am Band entspricht) oder erst an einem Nacharbeitsplatz behoben werden kann (zusätzlich ist der Taktverlust, also die verringerte Ausbringung der Linie um eine komplette Einheit, zu addieren)¹⁰. Hiermit sind folgende Szenarien abgedeckt:

- Der Werker bemerkt seinen Fehler selbst und kann ihn selbst beheben, wie es beim Fehler „Teil vergessen“ die Regel sein wird. ⇒ Bandstopp
- Der Werker bemerkt seinen Fehler selbst und kann ihn nicht selbst beheben, wie es beim Fehler „Teil beschädigt“ vorkommen kann. ⇒ Bandstopp oder Taktverlust
- Der Werker bemerkt seinen Fehler nicht, sondern der Fehler wird erst im weiteren Montageablauf entdeckt. ⇒ Taktverlust

4.2.7 Zuordnung von Abweichungskosten

Die Abweichungskosten wie Nacharbeitsaufwände, Ausschusskosten oder Gewährleistungskosten werden – wie in Abbildung 27 gezeigt – den Fehlern in der gleichen Zeile der Matrix zugeordnet. Dazu wird auch hier auf das Erfahrungswissen der Werker zurückgegriffen, da diese – aufgrund der täglichen Praxis – fundierte Aussagen zu den für die Fehlerbehebung notwendigen Zeiten – hier werden alle notwendigen Arbeitsschritte wie

¹⁰ Ein großes Problem des Kennzeichnens einer fehlerhaften Einheit zur Nicht-Bearbeitung in den folgenden Prozessschritten bei der Fließfertigung stellen die Teile dar, die in Sequenz an die Linie geliefert werden – diese müssen gesammelt und zum Reparaturplatz weitergeleitet werden.

Demontageschritte, Werkzeug- und Materialbeschaffung sowie Montage bedacht – tätigen können.

				Prozess schritt 1	Prozess schritt 2	Prozess schritt 3	Prozess schritt 4	Prüfschritt 1 (Lecktest)	Prozess schritt 5	Prozess schritt 6	Prüfschritt 2 (Kalttest)
Nacharbeit	Ausschuss	Teil	Fehler	S1	S1	S2	S2	T1	S3	S3	T2
300	0	Teil 1	vergessen								
600	2,50	Teil 1	vertauscht		3						1
600	5	Teil 2	verdreht								

Abbildung 27 Zuordnung von Abweichungskosten

Die Erfassung der für die Fehlerbehebung notwendigen Zeiten erfolgt in Sekunden. Die daraus resultierenden Kosten pro Jahr werden wie oben beschrieben durch Multiplikation mit den Kosten für die Arbeitszeit und den pro Jahr zu erwartenden Fehlern berechnet.

$$Kosten_{NAa} = Nacharbeitszeit_f \cdot Arbeitskosten \cdot f_a \quad (4.1)$$

mit

Kosten_{NAa} ... Kosten der Nacharbeit pro Jahr

Nacharbeitszeit_f ... notwendige Nacharbeitszeit zur Fehlerbehebung

f_a ... Fehler pro Jahr

Die Ausschusskosten werden entsprechend durch

$$Kosten_{Aa} = Ausschusskosten_f \cdot P_{Aus} \cdot f_a \quad (4.2)$$

mit

Kosten_{Aa} ... Kosten für Ausschuss pro Jahr

Ausschusskosten_f ... Kosten des Teils (incl. Verschrottungskosten)

P_{Aus} ... Anteil der zu verschrottenden Teile (Wahrscheinlichkeit Verschrottung)

f_a ... Fehler pro Jahr

berechnet. Da hier die vereinfachende Annahme eines linearen Anstiegs der Wertschöpfung getroffen wird, kann die verlorene Wertschöpfung gleich dem halben Aufwand für die Fehlerbehebung gesetzt werden, siehe dazu auch Abbildung 26.

Die gesamten aus dem Fehler resultierenden Kosten errechnen sich dann durch

$$\mathbf{Kosten\ Fehler}_{Jahr} = \mathbf{Kosten}_{Aa} + (1.5 \cdot \mathbf{Kosten}_{NAa}) \quad (4.3)$$

mit

Kosten Fehler_{Jahr} ... Gesamte Fehlerkosten pro Jahr

Kosten_{NAa} ... Kosten der Nacharbeit pro Jahr

Kosten_{Aa} ... Kosten für Ausschuss pro Jahr

Zur Bewertung der Gewährleistungskosten wird sinnvollerweise ein Katalog verwendet, der entsprechend den im Feld beobachteten Gewährleistungskosten strukturiert ist. In Tabelle 6 ist ein möglicher Katalog dargestellt.

Bedeutung	Bedeutung im Feld	Gewährleistungskosten [€/Einheit]	
sehr hoch	Sicherheitsrisiko		10
sehr hoch	Nichterfüllung gesetzlicher Vorschriften, Liegenbleiber		9
hoch	Gesamtsystemaustausch	5.000 €	8
hoch	Teiletausch, Baugruppentausch	3.000 €	7
mäßig	Reparatur	1.000 €	6
mäßig	Kleine Reparatur	500 €	5
mäßig	Große Einstellung	200 €	4
gering	Kleine Einstellung	50 €	3
gering		10 €	2
sehr gering	Keine Kosten	0 €	1

Tabelle 6 Katalog zur Bewertung der Fehlerfolgen

Die Bewertungsstufen 9 und 10 dienen, analog zur FMEA, als Marker für sicherheitsrelevante Fehler – dies kann eine Gefahr für Kunden oder Werker sein (B=10), oder eine Gefahr für das Unternehmen wegen Verstoßes gegen gesetzliche Regularien darstellen (B=9). Dieser Katalog ist

entsprechend den tatsächlichen Gewährleistungskosten anzupassen, das gezeigte Beispiel könnte so für den Motor eines Mittelklassefahrzeugs verwendet werden. Die Erfassung der Gewährleistungskosten kann und sollte zeitlich getrennt durch Personen erfolgen, die intensiv die Reklamationen bzw. Felddaten bearbeiten. Um die geschätzten Werte den beobachteten Felddaten anzupassen, wird ein Faktor „Übergangswahrscheinlichkeit“ eingeführt, der im Prinzip die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Fehlerfolge innerhalb der Gewährleistungsfrist darstellt.

4.2.8 Prüfmaßnahmen

Die Prüfmaßnahmen können direkt im Analyseworkshop oder in einem separaten Workshop diskutiert werden. Die Investitionen für die schon bekannten, bereits geplanten Prüfungen werden direkt der entsprechend Station zugeordnet.

4.2.9 Bewertung von Prüfinvestitionen

Die Prüfinvestitionen – also die zur Fehlerentdeckung definierten Prüfmaßnahmen – müssen, falls keine konkreten Angebote vorliegen, geschätzt werden. Auch hier wird auf das Erfahrungswissen gebaut – in diesem Fall auf das der Planer.

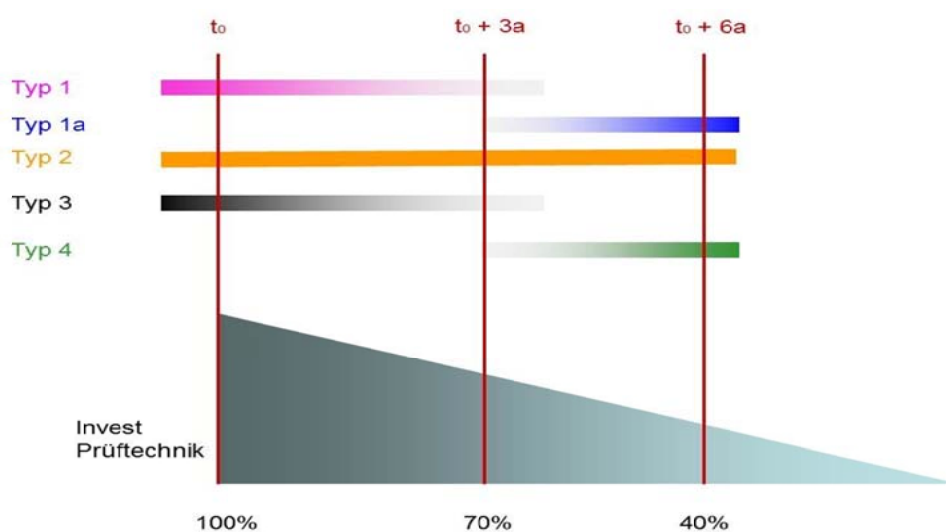


Abbildung 28 Handhabung von "Facelifts"

Für die speziell im Automobilbau auftretende Situation des „Facelifts“, manchmal auch „Produktaufwertung“ oder „Modellpflege“ genannt, lässt sich einfach der anzuwendende Anteil an den Investitionen in die Prüftechnik ermitteln:

Wie Abbildung 28 zeigt, kann durch Berücksichtigung der linearen¹¹ Abschreibung eine Investition in Prüftechnik mit ihrem Restwert zum Zeitpunkt t_0+3a den Fehlerkosten, die ab diesem Zeitpunkt prognostiziert werden, gegenübergestellt werden.

4.2.10 Darstellung der Analyseergebnisse

Die berechneten Fehlerkosten können als einfache, absteigend nach Kosten geordnete Balkendiagramme dargestellt werden, um bei der Maßnahmendiskussion die wirtschaftliche Reihenfolge einzuhalten.

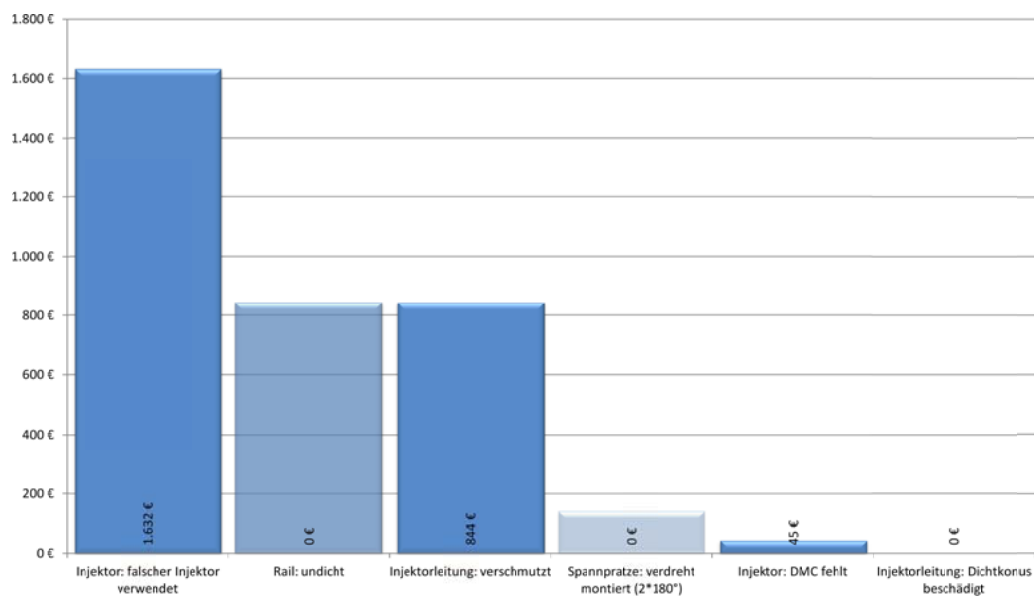


Abbildung 29 ABC-Diagramm der Nacharbeitskosten

¹¹ Für Anlagen, die seit dem 1.1.2011 beschafft worden sind, ist nur noch die lineare Abschreibung zulässig. Der Zeitraum für die vollständige Abschreibung ist variabel und hängt von der Einstufung in den entsprechenden Tabellen ab, beispielsweise für „Vermessungsgeräte (elektronisch)“ 8 Jahre. [Bundesministerium der Justiz 31.07.2012 #188]

In Abbildung 29 symbolisiert der hellste (oberste) Balkenteil die schon durch umgesetzte oder in Umsetzung befindlichen Maßnahmen reduzierten Nacharbeitskosten, der dunklere (mittlere) Balkenteil die noch erzielbaren Kostenreduktionen durch noch offene (noch nicht zur Umsetzung entschiedene) Maßnahmen und die dunkelsten (unteren) Balkenteile die verbleibenden, prognostizierten Nacharbeitskosten unter Berücksichtigung aller Maßnahmen.

4.2.11 Abgleich mit Kundenprüfungen

Der Abgleich von potentiell durchlaufenden Fehlern mit Kunden erfolgt sinnvollerweise nicht mit der eigentlichen Fehler-Prozess-Matrix, sondern mit einer Liste, die diese Fehler gefiltert enthält. Diese Reduktion der Informationen auf das absolut nötige trägt zur Vermeidung von Störungen bei.

	A	B	C	D	E	F
1	FPM:		Montage			
2	fid	Komponente	Fehler	Variante	E	NA [min]
3	101010	Rail	undicht		1	240
4	101020	Injektorleitung	verbogen			
5	101030	Injektorleitung	Dichtkonus beschädigt			
6	101040	Injektorleitung	verschmutzt			
7	101050	HDP	Schutzkappe fehlt			
8	101070	Injektor	Düse beschädigt		8	480
9	101090	Spannpratze	verdreht montiert (2*180°)			
10	101110	Schraube	beschädigt			
11	101120	Schraube	fehlerhaft			
12	101130	Injektorbarcode	verschmutzt		1	480

Abbildung 30 Abgleich von durchlaufenden Fehlern mit dem Kunden

In Abbildung 30 ist ein entsprechendes Arbeitsblatt dargestellt. Es enthält lediglich eine Fehler-Identifikationsnummer, die betroffene Komponente (Fehlerort), den Fehler (Fehlerart), die Variantenkennung, eine Spalte mit den Werten für die Entdeckungswahrscheinlichkeit E und eine Spalte mit

den Angaben für die beim Kunden anfallenden Nacharbeitszeiten (falls ein Fehler entdeckt wird).

4.2.12 Fehlerfluss

In Abbildung 31 ist eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung von Fehlerschwerpunkten im Prozess dargestellt – insbesondere der Fehlereintrag durch Kaufteile und die Fehlerreduktion durch die großen Prüfstationen lassen sich so transparent machen. Die im Prozess auftretenden Fehler werden über den Zeitverlauf aufsummiert, die Fehlerentdeckungen werden von dieser Fehlersumme wieder subtrahiert. Dadurch ergibt sich eine Übersichtsdarstellung des Fehlergeschehens über den Prozessverlauf hinweg. Jeder steile Anstieg der Kurve zeigt einen überproportionalen Fehlereintrag in den Prozess, jeder steile Abstieg repräsentiert in der Regel eine aufwändige Prüfstation oder Prüfeinrichtung. Im Diagramm werden alle Fehler namentlich eingetragen, die über einem definierten Schwellwert liegen – im gezeigten Diagramm sind das alle Fehler mit $f_a \geq 500$.

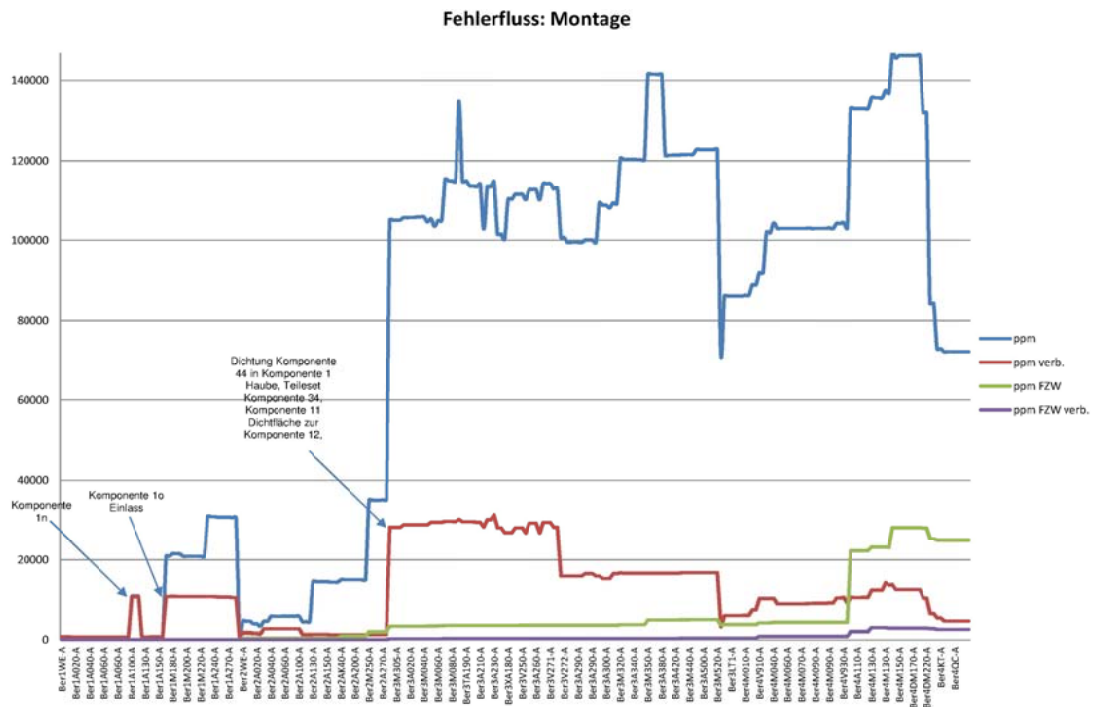


Abbildung 31 Darstellung des Fehler-auf- und -abbau über den Prozess

4.2.13 Berücksichtigung von Mehrfach-Auftreten oder Mehrfach-Entdeckung

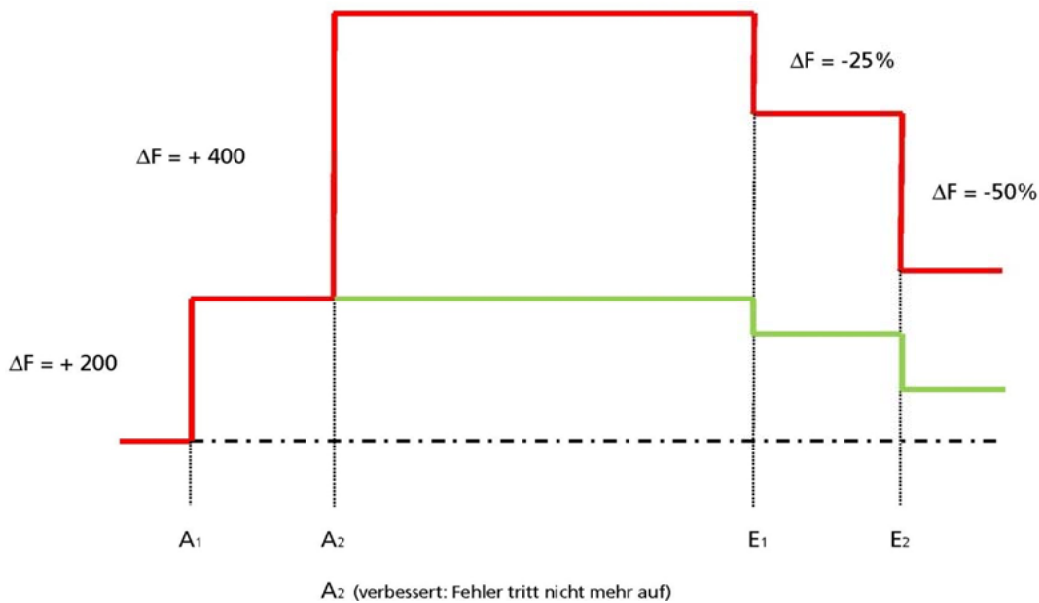


Abbildung 32 Änderungen im Fehlerfluss bei multiplen Entstehungs- und Entdeckungsorten

4.2.14 Kennzahlen

Aus den vorhandenen Daten lassen sich weitere Kennzahlen ableiten – da die Fehlerwahrscheinlichkeiten P_i für alle Arbeitsschritte bekannt sind¹², lässt sich der Anteil der ohne Prozessstörung produzierten Einheiten („right-first-time“, „first pass yield“) berechnen:

$$RFT = \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (4.4)$$

mit

RFT ... Anteil der in einem fehlerfreien Prozess produzierten Einheiten

¹² Nicht erfasst können Arbeitsgänge nur sein, wenn ein Fehlerauftritt ausgeschlossen wird, damit ist für diese Arbeitsgänge $P = 0$.

Eine weitere Kennzahl ist die Nacharbeitszeit je produzierter Einheit, die ein einfaches Verhältnismaß zur Montagezeit bietet und damit eine Aussage zur Effizienz des Prozesses liefert.

4.2.15 Anpassung des Bewertungskataloges an die Jahresproduktion

Der Standardbewertungskatalog der neuen Methode besteht aus stückzahlenbasierten und zeitbasierten Bewertungselementen. Die stückzahlenbasierte Elemente sind – wie weiter oben erwähnt – als Bewertung für systematische Fehler gedacht, um grobe Planungsfehler aufzeigen zu können. Dies ist für hinreichend große (> 100.000 E/a) Produktionszahlen problemlos, für kleinere Jahresproduktionen entstehen nicht monotone Verläufe der Wahrscheinlichkeiten des Fehlerauftritts.

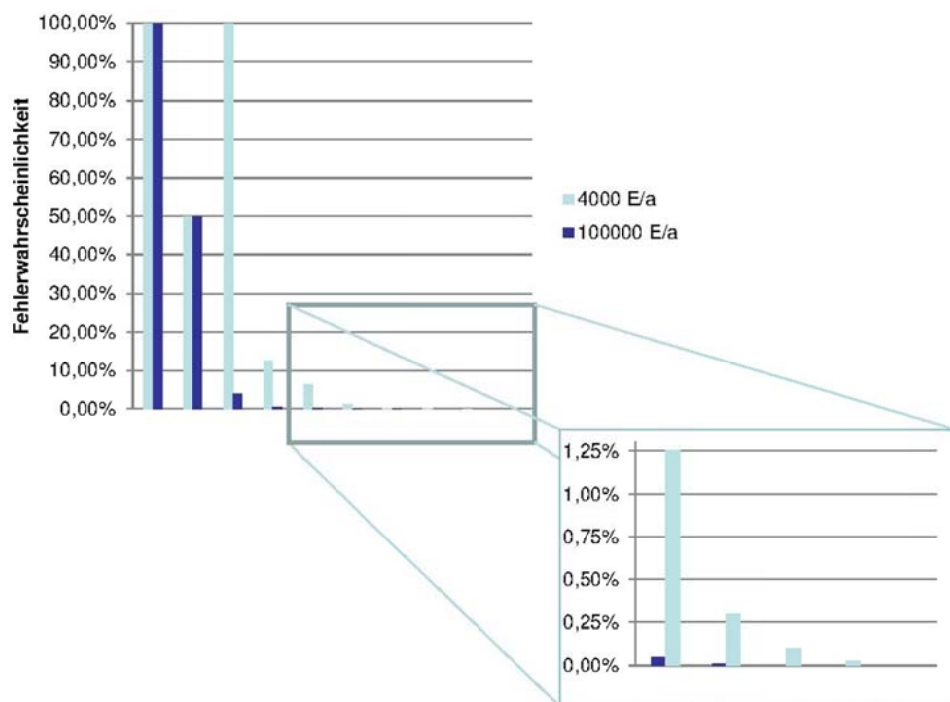


Abbildung 33 Fehlerwahrscheinlichkeiten bei veränderten Produktionszahlen

In Abbildung 33 ist die durch den Übergang von stückbasierten (A = 9,10) zu zeitbasierten (A = 1-8) Bewertungen für kleine Jahresproduktionen (hier für 4000 produzierte Einheiten pro Jahr) auftretende Diskontinuität der Fehlerwahrscheinlichkeiten dargestellt. Für die Bewertungsstufe 8 ergibt

sich bei 100.000 produzierten Einheiten pro Jahr eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 4%, bei 4.000 produzierten Einheiten pro Jahr von 100%. Dies muss durch Anpassung des Bewertungskataloges vermieden werden. Eine Möglichkeit ist der Verzicht auf die stückbasierten Bewertungselemente, eine andere die Wahl passender, längerer Fehlerintervalle wie „alle zwei Wochen“, „alle zwei Monate“, „zweimal pro Jahr“.

In Tabelle 7 sind mögliche Bewertungsstufen und die Auswirkungen der unterschiedlichen Jahresproduktionszahlen auf die sich dadurch ergebenden Fehlerzahlen pro Jahr dargestellt.

Auftreten	Fehler/a (100.000 E/a)	Fehler/a (10.000 E/a)	Fehler/a (1.000 E/a)
über 1 Jahr her	0	0	0
einmal/ Jahr	1	1	1
zweimal / Jahr	2	2	2
einmal/ Quartal	4	4	4
zweimal / Quartal	8	8	8
einmal / Monat	12	12	12
zweimal / Monat	24	24	24
einmal / Woche	50	50	50
dreimal / Woche	150	150	150
einmal / Tag	250	250	250
einmal / Schicht	500	500	500
zweimal / Schicht	1000	1000	1000
fünfmal / Schicht	2500	2500	2500
einmal / Stunde	4000	4000	4000
dreimal / Stunde	12000	12000	12000
jede 20. Einheit	5000	500	50
jede 10. Einheit	10000	1000	100
jede 5. Einheit	20000	2000	200
jede zweite Einheit	50000	5000	500
jede Einheit	100000	10000	1000

Tabelle 7 mögliche Bewertungsstufen für den Fehlerauftritt

Für kleine Stückzahlen (1000 Einheiten/Jahr) bietet sich ein eine Auswahl aus diesem Katalog in Form von Tabelle 8 an.

A	Beschreibung	Fehler / Jahr
10	zweimal / Schicht	960
9	Jede zweite Einheit 500	875
8	Einmal / Tag	240
7	Dreimal / Woche	144
6	Einmal / Woche	48
5	Alle 2 Wochen	24
4	Einmal / Monat	12
3	Einmal / Quartal	4
2	Einmal / Jahr	1
1	Keine Erinnerung	0

Tabelle 8 Bewertungskatalog für den Fehlerauftritt bei kleinen Jahresproduktionszahlen

4.2.16 Vermeidungsmaßnahmen

Maßnahmen zur Vermeidung von Fehlern sollten in einem separaten Workshop definiert werden – wobei es durchaus sinnvoll erscheint, entsprechende Ideen, die sich bei der Diskussion der Prozessschritte ergeben, für die Verwendung im Maßnahmen-Workshop in einem Ideenspeicher zu erfassen.

Im Maßnahmen-Workshop wird auf Auswertungen der im Analyseworkshop gewonnen Daten zurückgegriffen: es bietet sich eine Priorisierung nach Nacharbeits- und Ausschusskosten oder eine Priorisierung nach den prognostizierten Gewährleistungskosten an. Zusätzlich sollte eine Liste der durchschlüpfenden Fehler und muss eine Liste der als kritisch eingestuften Fehler diskutiert werden.

4.3 Informationstechnische Umsetzung der Methode

Das klassische Werkzeug des Ingenieurs ist heute die Tabellenkalkulation. Auf einfache Weise lassen sich komplexe Zusammenhänge berechnen und darstellen. Für die Anwendung als Werkzeug zur Durchführung der neuen Methode ist sie ebenfalls gut geeignet: die Darstellung der Matrix ist einfach, über Hilfsmittel wie die „bedingte Formatierung“ können leicht erkennbar Fehlerauftreten und Fehlerentdeckung gekennzeichnet werden. Die Berechnungen zur Umsetzung von Fehlerwahrscheinlichkeiten in absolute Stückzahlen sind mittels Formeln möglich.

Es gibt jedoch auch Einschränkungen: in einigen Produkten zur Tabellenkalkulation ist die Anzahl der verfügbaren Spalten begrenzt, zu dem leidet – bei hohen Prozessschrittzahlen oder Komponentenzahlen – die Übersichtlichkeit. Nichtsdestotrotz ist die Tabellenkalkulation für kleine bis mittlere Analysen das Werkzeug erster Wahl und erleichtert den Einsatz bei kleineren und mittleren Unternehmen.

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente eines möglichen Werkzeugs zur Unterstützung der neuen Methode kurz dargestellt.

4.3.1 Prozessablauf

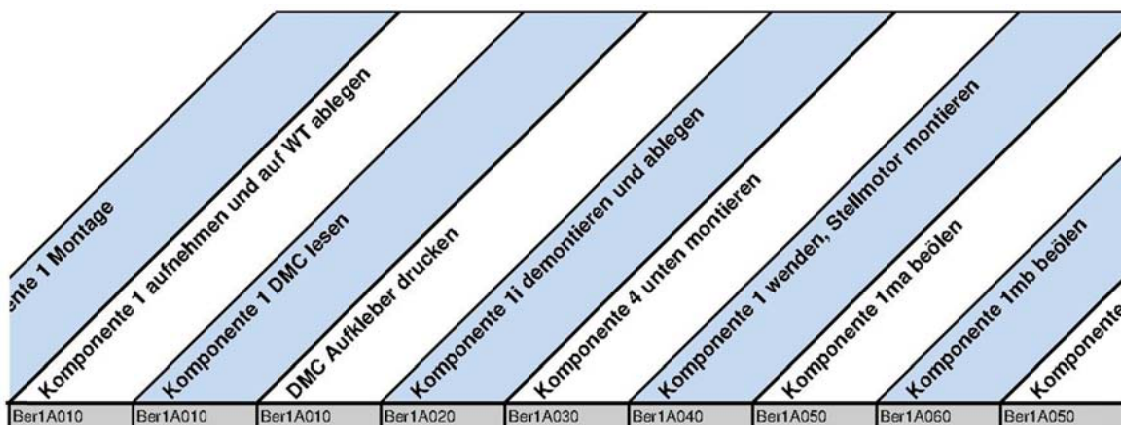


Abbildung 34 Darstellung des Prozessablaufs in der Tabellenkalkulation

Abbildung 34 zeigt die Umsetzung der Prozessschrittachse in der Tabellenkalkulation. Die einzelnen Arbeitsstationen sind unterhalb der

Prozessschritte dargestellt und können so später der stationsbezogenen Darstellung des Fehlergeschehens dienen. Die Prozessschritte – beziehungsweise wie oben beschrieben die Funktionen – sind der besseren Lesbarkeit wegen geneigt dargestellt, die aufeinanderfolgenden Schritte sind farbig alterierend markiert¹³.

4.3.2 Zuordnung Fehler zu Prozessschritt

Durchschlupf in der Linie	Durchschlupf in der Linie, verb.	Komponente	Fehler	Ber2A020	Ber2A030	Ber2A040	Ber2A050
J	J	Komponente 11	Bearbeitungsfehler				
J	J	Komponente 14	DMC nicht lesbar				
N	N	Komponente 14	Komponente 14a beschädigt				
J	J	Komponente 15	Span aus Gewinde unter Komponente 15		-7		
J	N	Komponente 16	Spanbildung durch Verschraubung			-7	

Abbildung 35 Darstellung der Matrix in der Tabellenkalkulation

In Abbildung 35 ist der Grundaufbau der Matrix in der Tabellenkalkulation dargestellt. Die möglichen Fehler werden pro Arbeitsstation aufgenommen und bewertet. Die Rechenschritte (einfache Additionen bzw. Multiplikationen) lassen sich durch Formeln realisieren, die farbige Markierung von Auftreten eines Fehlers (rot) und Entdeckung eines Fehlers

¹³ Bei Microsoft Excel™ lässt sich die alternierende Einfärbung der Spalten über eine bedingte Formatierung realisieren. Die bedingte Formatierung muss von folgender Formel abhängig sein: =REST(SPALTE();2)=1 und ein entsprechendes Füllmuster zugewiesen bekommen.

(grün) werden durch eine bedingte Formatierung realisiert. Dazu ist als kleiner Kunstgriff die Eingabe der Auftrittswahrscheinlichkeit als negative Zahlen von -1 bis -10 notwendig, was kein Nachteil sein muss, denn negative Zahlen werden per se als nicht wünschenswert wahrgenommen. Die Möglichkeit, dass ein Fehler den Prozess verlässt, wird durch eine Markierung in der Zeile sofort angezeigt (siehe Spalte „Durchschlupf in der Linie“ in Abbildung 35), auch hier wieder mit farbiger Hervorhebung, d.h. den Prozess (möglicherweise) verlassende Fehler werden rot markiert.

4.3.3 Fehlerzahlen

Durch Zuordnung der Daten für

- die Anzahl der zu produzierenden Einheiten pro Schicht,
- das Schichtmodell und
- die Anzahl der Arbeitstage pro Jahr

lassen sich durch die oben erwähnten einfachen Rechenschritte die zu erwartende Anzahl von fehlerhaften Einheiten pro Jahr sofort ermitteln (Abbildung 36). Diese für das Team sofort sichtbare Zahl bietet zusätzlich zur transparenten Darstellung der Fehlersituation eine sofortige Plausibilitätsprüfung der angenommenen Werte.

	Anzahl betroffener Einheiten	Anzahl ins Feld gelangender Einheiten	Fehler in Endwerk / vor Auslieferung	Durchschlupf in der Linie	Durchschlupf in der Linie, verb.	Komponente	Fehler	WE Komponente
Lfd								Ber1WE
100700	12	12	0	J	J	Komponente 11	Bearbeitungsfehler	
100710	50	12	0	J	J	Komponente 14	DMC nicht lesbar	
100720	0	0	0	N	N	Komponente 14	Komponente 14a beschädigt	
100730	500	500	0	J	J	Komponente 15	Span aus Gewinde unter Komponente 15	
100740	500	500	0	J	N	Komponente 16	Spanbildung durch Verschraubung	

Abbildung 36 Darstellung der Fehlerzahlen

Dies kann zum Beispiel erforderlich sein, wenn die geplante Montagelinie gegenüber bisherigen Linien, auf denen das Erfahrungswissen der Werker beruht, stark in den Produktionszahlen abweicht – dann muss im Einzelfall geprüft werden, ob der Fehler eher in Folge der Arbeitsbelastung (komplexe Aufgabe, Zeitdruck) oder durch äußere Störeinflüsse (optische oder akustische Reize) entstanden ist. Im ersten Fall empfiehlt es sich, die Erfahrungswerte zu skalieren; im zweiten Fall empfiehlt es sich, die Erfahrungswerte beizubehalten – natürlich unter der Voraussetzung, dass sich die Störeinflüsse nicht in Folge der Taktverkürzung erhöhen.

Einheiten pro Schicht	200
Stunden pro Schicht	8
Schichten pro Tag	2
Produktionstage in der Woche	5
Produktionstage im Jahr	250

Durchschlupf			100,0%	99,5%	99,0%	97,5%	95,0%	90,0%	75,0%	50,0%	25,0%	0,0%
Potentiell defekte Einheiten pro Tag	Potentiell defekte Einheiten pro Jahr		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,004	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0,016	4	3	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4
0,048	12	4	0	0	0	0	1	1	3	6	9	12
0,200	50	5	0	0	1	1	3	5	13	25	38	50
1,000	250	6	0	1	3	6	13	25	63	125	188	250
2,000	500	7	0	3	5	13	25	50	125	250	375	500
16	4000	8	0	20	40	100	200	400	1000	2000	3000	4000
200	50000	9	0	250	500	1250	2500	5000	12500	25000	37500	50000
400	100000	10	0	500	1000	2500	5000	10000	25000	50000	75000	100000

Nacharbeit			100,0%	99,5%	99,0%	97,5%	95,0%	90,0%	75,0%	50,0%	25,0%	0,0%
Potentiell defekte Einheiten pro Tag	Potentiell defekte Einheiten pro Jahr		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,004	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0,016	4	3	4	4	4	4	4	4	3	2	1	0
0,048	12	4	12	12	12	12	11	11	9	6	3	0
0,200	50	5	50	50	50	49	48	45	38	25	13	0
1,000	250	6	250	249	248	244	238	225	188	125	63	0
2,000	500	7	500	498	495	488	475	450	375	250	125	0
16	4000	8	4000	3980	3960	3900	3800	3600	3000	2000	1000	0
200	50000	9	50000	49750	49500	48750	47500	45000	37500	25000	12500	0
400	100000	10	100000	99500	99000	97500	95000	90000	75000	50000	25000	0

Abbildung 37 AxE-Matrix (Henke 2012)

Abbildung 37 zeigt die Umsetzung in der Tabellenkalkulation zur Ermittlung der nachzuarbeitenden beziehungsweise zum Kunden gelangenden fehlerhaften Einheiten (Durchschlupf). In den Feldern D1 bis D5 werden die oben genannten Werte für Einheiten pro Schicht, Stunden pro Schicht, Anzahl Schichten pro Tag, Produktionstage pro Woche und Jahr eingetragen.

Die Werte für die pro Jahr zu erwartenden Fehlerzahlen können direkt berechnet werden nach

$$f_a = E_{Schicht} \cdot Schichten_{Tag} \cdot Produktionstage_{Jahr} \cdot P_A \quad (4.5)$$

mit

$$f_a = \text{Fehlerhafte Einheiten pro Jahr}$$

$$E_{Schicht} = \text{Produzierte Einheiten pro Schicht}$$

$$P_A = \text{Wahrscheinlichkeit des Fehlerauftritts}$$

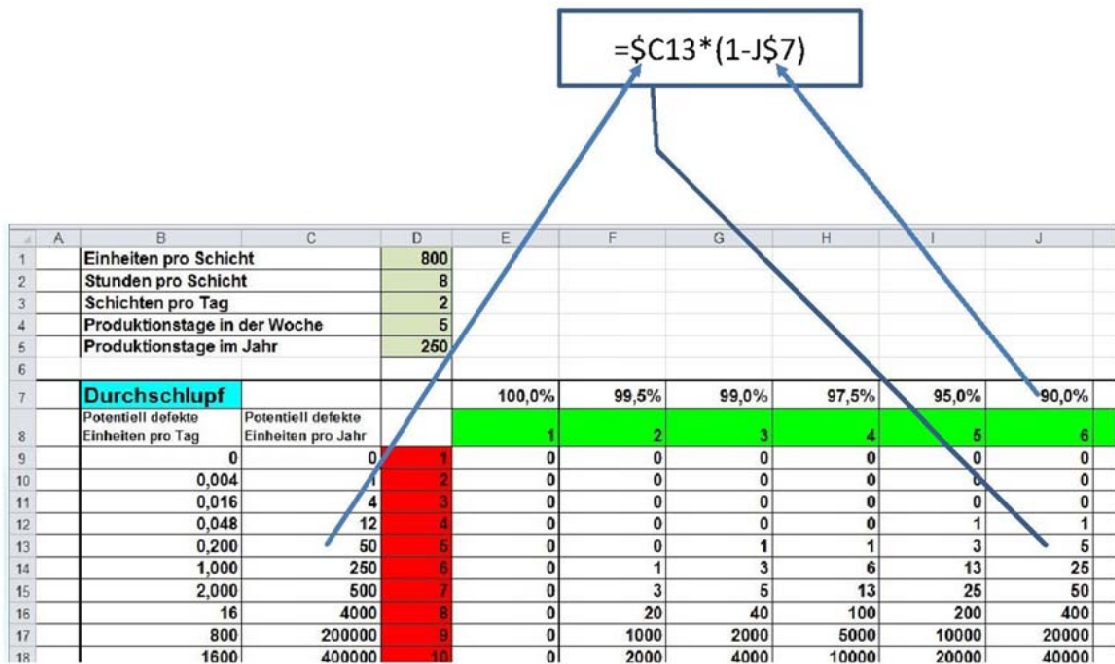


Abbildung 38 Berechnungsbeispiel A x E

Durch einfache Formeln für alle Kombinationsmöglichkeiten von A und E in den Tabellenfeldern lässt sich die Anzahl „durchschlüpfender“ bzw. nachzuarbeitender Einheiten direkt ablesen. Dies erfolgt wie in Abbildung 38 dargestellt. Der Durchschlupf errechnet sich nach

$$dl_a = f_a \cdot (1 - P_E) \quad (4.6)$$

mit

dl_a ... Zahl der durchschlüpfenden fehlerbehafteten Einheiten pro Jahr

f_a ... Zahl der fehlerbehafteten Einheiten pro Jahr

P_E ... Entdeckungswahrscheinlichkeit für den spezifischen Fehler

und die Anzahl nachzuarbeitender Einheiten somit nach

$$na_a = f_a \cdot P_E \quad (4.7)$$

mit

na_a ... Zahl der nachzuarbeitenden Einheiten pro Jahr

Die oben beschriebene Berechnungsmatrix liefert die Voraussetzungen, um bei Eingaben in der Fehler-Prozess-Matrix eine sofortige Aktualisierung der

angezeigten Werte für f_a und den daraus abgeleiteten Werte für dl_a und na_a vorzunehmen (siehe Abbildung 36).

Dazu ist eine anwendungsspezifische Programmierung notwendig, die jedoch bei allen am Markt verfügbaren Tabellenkalkulationen möglich ist.

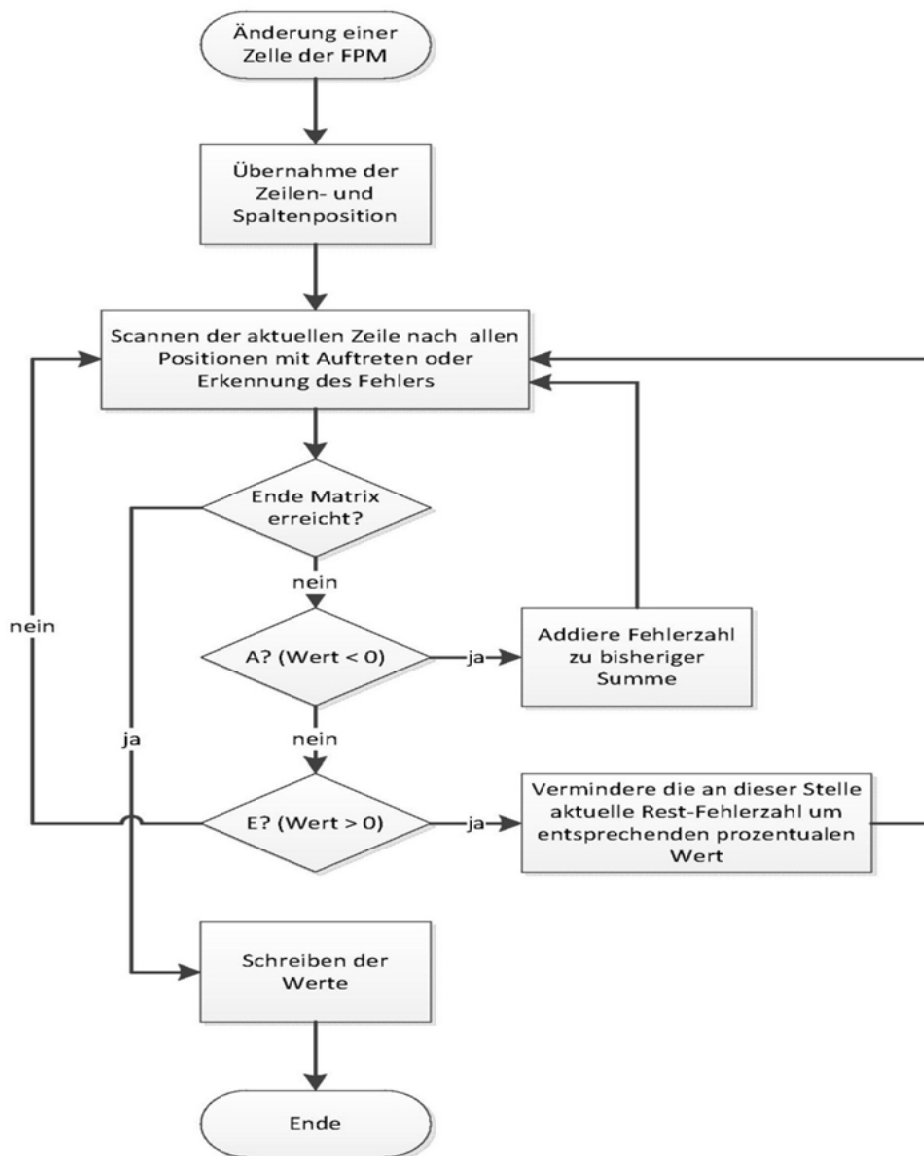


Abbildung 39 Programmablaufplan des FPM-Makros

Abbildung 39 zeigt einen Programmablaufplan (PAP) für die Realisierung einer solchen anwendungsspezifischen Programmierung für Microsoft Excel™ in VBA (Visual Basic for Applications). Es reicht – wie im PAP

dargestellt – völlig aus, nur die jeweils betroffene Zeile (in der eine Eingabe erfolgte) zu durchsuchen. Dadurch ist auch auf langsameren Geräten wie Tablets eine ausreichende Performance gegeben, d.h. die Aktualisierung erfolgt deutlich unter der ergonomisch geforderten Ein-Sekunden-Grenze.

Der folgende Abschnitt zeigt einen Teil des Makros, der den oben gezeigten PAP in VBA umsetzt¹⁴.

```
' scan through columns of matrix, i is set to current line
  For j = FirstColumn To LastColumn
    Set curCell = Cells(i, j)
    If IsNumeric(curCell.Value) = True Then
      momVal = Cells(i, j)
      If momVal < 0 Then
        If momVal < a Then
          a = momVal
        End If
      ElseIf momVal > 0 Then
        If momVal < e Then
          e = momVal
        End If
        ' try to combine the different detection probabilities
        ' (iterative Binomi)
        eMom = Worksheets("AxE Matrix").Cells(7, momVal +
4).Value
        eProb = eProb - (eProb * eMom)
        eProbAct = eProbAct + eProb
      End If
    End If
  Next j

  Cells(i, 8) = Abs(a)
  Worksheets("Daten").Cells(i, 10) = eProb
```

Durch Erweiterung dieses Makros können auch komplexere Verhältnisse erfasst werden, wie zum Beispiel das Auftreten des gleichen Fehlers an

¹⁴ Im gezeigten Code sind vereinfachende Annahmen getroffen: es wird nur der höchste Wert der Auftretenswahrscheinlichkeit (hier der vom Betrag her größte Wert, da die Werte für die Auftretenswahrscheinlichkeit wegen der Möglichkeiten der „bedingten Formatierung“ negativ eingegeben werden). Die Initialisierung der Werte a (Auftrittswahrscheinlichkeit) und e (Entdeckungswahrscheinlichkeit) erfolgt beim Eintritt in die gezeigte Eventhandler-Funktion.

verschiedenen Stellen des Prozesses oder – was in der Realität oft vorkommt – eine abgestufte Entdeckung eines Fehlers an mehreren Stellen des Prozesses, wie in Abbildung 32 dargestellt.

4.3.4 Fehlerkosten

Nach dem Eintragen der A-Werte für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Fehlers, und der Abfrage des Entdeckungsortes und des E-Werts bzw. der E-Werte – es ist nicht ungewöhnlich, dass Fehler nicht nur an den dafür vorgesehenen Prüfstationen, sondern auch in folgenden Montageprozessschritten entdeckt werden – wird der Nacharbeitsaufwand für die Entdeckungsstellen und der entstehende Anteil an Ausschuss erfasst.

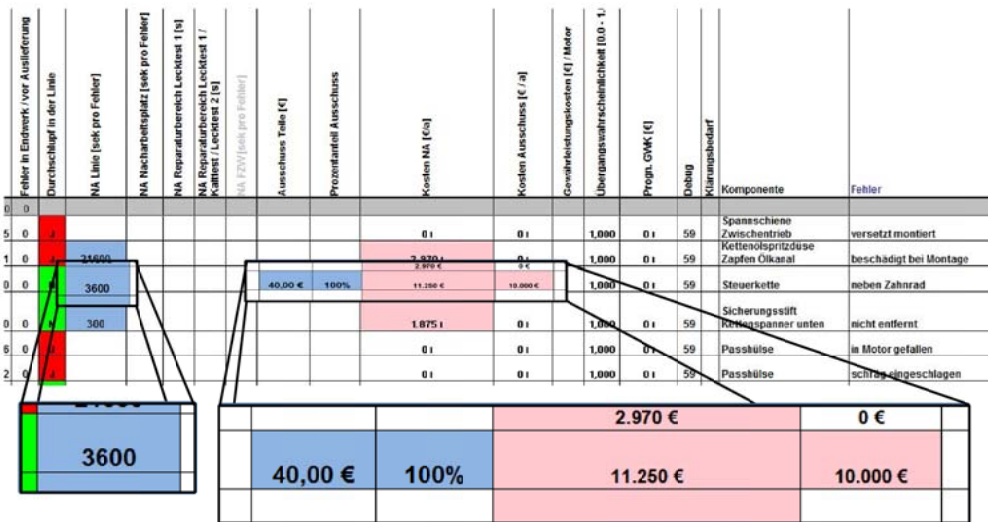


Abbildung 40 Bewertung der Nacharbeitsaufwände

Die unmittelbare Berechnung der Nacharbeits- und Ausschusskosten (Abbildung 40) hilft bei der Plausibilisierung der erfassten Werte für Fehlerhäufigkeit und -Entdeckung. Die Spalten zur Bewertung der Nacharbeits-

und Ausschusskosten werden sinnvollerweise nur bei Bedarf eingeblendet¹⁵, damit der Überblick über die eigentliche Matrix gewahrt bleibt.

Der Einsatz von benannten Zellen in der Tabellenkalkulation für die Kosten der auszusondernden Teile erlaubt die zeitsparende Eingabe von Schätzwerten – so können die exakten Werte später an einer Stelle (z.B. auf einem separaten Arbeitsblatt) nachgepflegt werden. Für die Erfassung der Nacharbeitsaufwände ist – wie weiter oben bereits erwähnt – eine Aufnahme in Sekunden geeignet, aber es spricht nichts dagegen, bei Bedarf auch andere Zeiteinheiten zu wählen. Die unterschiedlichen Kostensätze, die für Werker am Band und für höher qualifiziertes Personal im Nacharbeitsbereich gelten, können auch durch entsprechende Korrektur der Nacharbeitszeiten abgebildet werden.

4.3.5 Auswertungen

Die zur Durchführung von Maßnahmen-Workshops notwendigen Auswertungen der aufgenommenen Daten erfolgen in zwei Schritten: im ersten Schritt werden die – für die jeweilige Betrachtung – spezifischen Daten auf ein separates Berichtsblatt kopiert. Dort ist durch die Verwendung von Filtern ein beliebiger Ausschnitt der gesamten Analysedaten wählbar. Dieses gefilterte Ergebnis der Analyse wird nun als Diagramm dargestellt. Für die Darstellung der signifikanten Werte bezüglich Nacharbeits- und Gewährleistungskosten ist ein Diagramm mit gestapelten Balken, die den aktuellen Stand der Bewertungen zeigen, am besten geeignet.

¹⁵ Dies kann in Microsoft-Excel™ durch Gruppieren der entsprechenden Spalten und wahlweises Ein- bzw. Ausklappen der betreffenden Gruppe erfolgen.

fid	Komponente	Fehler	Variante	Anzahl Fehler	Reiz. Fehler	Reiz. Fehler max.	Anzahl NA	Anzahl NA reduziert	Anzahl NA reduziert max.	Auftritt	Endschaltung	NA [s]	Anschlüsse [s]	Anzahl Anschlussfehler [%]	NA [Jahr]	NA red. [Jahr]	NA red. max. [Jahr]	Kosten NA [Jahr]	Kosten NA red. [Jahr]
5	100030	Komponente 1	grafbildung	50	50	50	13	13	13	Ber3LT1	Ber3LT1	5400	0	0	20 h	20 h	20 h	878 €	878 €
6	100050	Komponente 1	verschmutzt	4	4	4	4	4	4	Ber1WE	Ber3LT1	14400	0	0	16 h	16 h	16 h	720 €	720 €
7	100080	Komponente 1c	fehlt	12	12	10	10	10	10	Ber1WE	Ber1B9AD	0	0	0	0 h	0 h	0 h	0 €	0 €
8	100090	Komponente 1d	fehlt	12	12	12	12	12	12	Ber1WE	Ber3LT1	7200	0	0	24 h	24 h	24 h	1.000 €	1.000 €
9	100100	Komponente 1e	nicht durchge	4	4	4	4	4	4	Ber1WE	Ber4KT	28800	200	1	32 h	32 h	32 h	1.440 €	1.440 €
10	100110	Komponente 1f	nicht parallel	4	4	4	4	4	4	Ber1WE	Ber1A280	0	0	0	0 h	0 h	0 h	0 €	0 €
11	100130	Komponente 1h	nicht tief gena	4	4	1	1	1	1	Ber1WE	Ber4KT	14400	200	1	4 h	4 h	4 h	180 €	180 €
12	100140	Komponente 1h	schief eingep	4	4	1	1	1	1	Ber1WE	Ber4KT	14400	200	1	4 h	4 h	4 h	180 €	180 €
13	100150	Komponente 1i	nicht tief gena	1	1	1	1	1	1	Ber1WE	Ber1A280	0	0	0	0 h	0 h	0 h	0 €	0 €
14	100160	Komponente 1	DMC nicht les	50	50	50	50	50	50	Ber1WE	Ber1A10	600	0	0	8 h	8 h	8 h	375 €	375 €
15	100170	Komponente 1	vertauscht	4	4	4	4	4	4	Ber1WE	Ber1A010	300	0	0	0 h	0 h	0 h	15 €	15 €
16	100200	Komponente 1l	nicht montiert	1	1	1	1	1	1	Ber1WE	Ber1A030	600	0	0	0 h	0 h	0 h	8 €	8 €
17	100230	Komponente 1m (Kellnüt vert veroll		1	1	1	1	1	1	Ber1A050	Ber1A200	0	0	0	0 h	0 h	0 h	0 €	0 €
18	100260	Komponente 2	verändert mont	0	0	50	0	0	0	Ber1A140	Ber1B9AD	3600	0	0	50 h	0 h	0 h	2.250 €	0 €
19	100320	Komponente 1n	falsch positio	4000	4000	4000	4000	4000	4000	Ber1A100	Ber1A120	300	0	0	333 h	333 h	333 h	5.000 €	15.000 €
20	100330	Komponente 1n	nicht montiert	12	12	12	12	12	12	Ber1A100	Ber1A120	300	0	0	1 h	1 h	1 h	45 €	45 €
21	100340	Komponente 5	beschädigt (Dichtung, ESD)	1	1	1	1	1	1	Ber1A040	Ber4LT2	3600	30	1	1 h	1 h	1 h	45 €	45 €

Abbildung 41 Berichtsblatt im FPM-Tool

In Abbildung 41 ist ein Berichtsblatt des Werkzeugs dargestellt. Die Bereiche (Spalten), die automatisch gefüllt werden, haben eine blaue Hintergrundmarkierung, die Bereiche, die aus diesen Daten berechnet werden, haben einen grauen Hintergrund. Als Bedienungserleichterung sind die Fehler-Identifikationsnummern (fids) als Hyperlinks gestaltet, die beim Anklicken direkt in die FPM an die entsprechende Stelle verzweigen. Die erste Stufe der Analyse erfolgt durch Anklicken des Buttons „aktualisieren“, worauf eine Auswahlliste aller in dieser Datei vorhandenen FPM-Blätter angezeigt wird. Durch die automatischen Filter können nun beliebig komplexe Selektionskriterien umgesetzt werden, bevor durch Anklicken des Buttons „Diagramm erzeugen“ die verdichtete Darstellung erzeugt wird. In dieser Darstellung (Abbildung 42) werden, wie in Abschnitt 4.2.10 gezeigt, die Fehlerkosten in absteigender Sortierung dargestellt. Die sich – nach der Filterung auf dem Berichtsblatt – ergebenden Summen für Ausgangszustand, gegenwärtigen Stand und maximal erreichbaren Stand werden in entsprechend eingefärbten Elementen dargestellt.

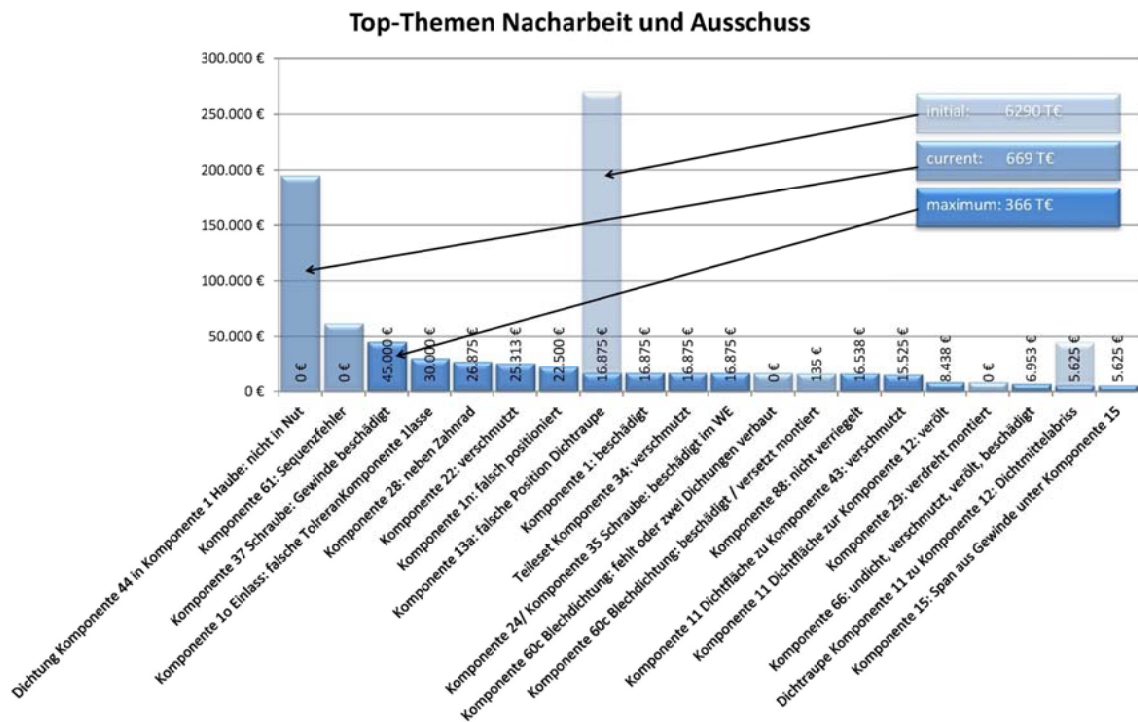


Abbildung 42 Diagramm der Nacharbeits-Schwerpunkte

4.3.6 Maßnahmandarstellung

Ein wesentlicher Aspekt der neuen Methode ist die Möglichkeit der wirtschaftlichen Gegenüberstellung von Fehlerkosten und Fehlervermeidungskosten. Dazu wird ebenfalls eine zweistufige Vorgehensweise realisiert: in einem ersten Schritt werden alle in der FPM definierten Maßnahmen gelistet (und können bei Bedarf ebenfalls gefiltert werden), im zweiten Schritt wird dann eine verdichtete Darstellung erzeugt.

Wie in Abbildung 43 zu sehen, kann in der Maßnahmenliste nach allen Kriterien gefiltert werden. Es sind Darstellungen aller Maßnahmen nach Status (in der Abbildung farblich markiert), nach Montagebereichen, Terminen oder Verantwortlichen möglich.

Id	Komponente	Fehler	Variante	A	E	A'	E'	Typ	Maßnahme	Status	Termin	Verantwortlich	Station
100280	Komponente 2	verdreh montiert	7	1	1			V	Position Schrauben ändern, so dass keine verdrehte Montage möglich ist (Poka Yoke)	x		A. Musterfrau	Ber1A140
100350	Komponente 10 Einlass	vertauscht (Klasse)	8	1	4			V	Klasse entfernt bei Klassenwechsel des KL.T mit der Restmenge alter Klasse und bringt diesen zum Sonderplatz für Weiterverwendung als Ersatzkomponente 10	o		A. Musterfrau	Ber1M170
100360	Komponente 10	falsch positioniert	4	3	3			V	Stützbohrung zur Fixierung der Komponente 10 bis Komponente 40 verbaut ist	x		A. Musterfrau	Ber1M170
100390	Komponente 6	falsch positioniert	4	3	3			V	Sollstop an Komponente 40-Station	o		A. Musterfrau	Ber1M180
100430	Komponente 6	verdreh montiert (Anschlag-Pin nach ob)	B	6	8	1		Erw	Komponente 6 nur unten einlagern, DMC nur in dieser Position lesbar	x		A. Musterfrau	Ber1A280
100530	Komponente 40	nicht beachtet	B	6	8	1	1	V	Ber1A280: Bei Gleichverteilungsmessung kurz in Max-Richtung drehen, bei erhaltendem Drehmoment wird worst case erkannt	x		A. Musterfrau	Ber1A240
100570	Komponente 9	unzureichend fixiert	B	8	1	1		V	Durchflussmengenkontrolle umgesetzt	x		A. Musterfrau	Ber1M230
100590	Komponente 10	DMC nicht lesbar	B	6	1	5		V	Stützvorrichtung für Komponente 9	o		M. Mustermann	Ber2WE
100630	Komponente 11	DMC nicht lesbar	B	6	1	5		V	DMC mit Scanner statt Kamerasystem	x		M. Mustermann	Ber2WE
100650	Komponente 11 Dichtfläche zur verschmutzt (betrifft Flüssigsdichtmittel)	verschmutzt	7	1	4			V	Dichtmittelaufruf erfolgt jetzt auf Komponente 12 -> Thema Prozessstörung auf Grund von Komponente 11 deutlich geringer	x		M. Mustermann	Ber2WE
100660	Komponente 11 Dichtfläche zur verschmutzt	verschmutzt	6	1	5			V	Zwischenlagendecken reinigen bei jedem Umlauf	x		Herr Beispiel	Ber2WE
100730	Komponente 15	Span aus Gewinde unter Komponente 15	6	1	4			V	Keine Aufhängen an Dichtflächen Komponente 11 + kein manuelles Einbringen, Paschuheln werden automatisch gesetzt	o		M. Mustermann	Ber2A030
100740	Komponente 15	Span aus Gewinde unter Komponente 15	7	1	5			V	verschwenken in SBAG030 vorarbeiten	x		M. Mustermann	Ber2A030
100740	Komponente 16	Spanabridung durch Verschraubung	7	1	1			V	Ableitung des Schweißglases in SBAG030 vorarbeiten	x		M. Mustermann	Ber2A040
100880	Komponente 18	Komponente 18 nicht verspannt	A	8	1	4		V	Aufweitung Kegetstz	o		Herr Beispiel	Ber2A130
100880	Komponente 18	Komponente 18 nicht verspannt	A	8	1	4		V	Reduzieren von Loosrad ausreichend groß, damit Einfluss der Verschraubung keinen Einfluss auf die Funktion hat	o		Patrick Mustermann	Ber2A130
100920	Komponente 14a Nr. 1	beschädigt bei Fliegen	1	10				V				M. Mustermann	
100930	Komponente 14a Nr. 2	beschädigt bei Fliegen	1	10				V				M. Mustermann	
100940	Komponente 19	beschädigt bei Fliegen	6	1	1			V	Kraft- und Weg überwachtes, radiales Greifen der Komponente 14 durch separate Einführvorrichtung (nur z-Richtung), anrechen durch Roboter	x		M. Mustermann	Ber2A200
100940	Komponente 19	beschädigt bei Fliegen	6	1	1			V	Ber2A200: Profistation für Stz Komponente 14a	x		M. Mustermann	Ber2A200
100970	Komponente 22	teilweise umgestützt bei Montage	4	10	4			V	Umstellung auf PTFE beschichteten Komponente 22; Montage mit zweistufigen Fügekonzept + optimierter Montageprozess	o		M. Mustermann	Ber2M260
100970	Komponente 22	teilweise umgestützt bei Montage	4	10	1			V	Eigener Locktest nur für Komponente 22 zu Komponente 17	o		M. Mustermann	Ber2M260
100980	Komponente 22	zur Glanze umgestützt bei Montage	4	10	4			V	Umstellung auf PTFE beschichteten Komponente 22	o		M. Mustermann	Ber2M260
100980	Komponente 23	verschmutzt auf Teilesatz	4	10	3			V	Eigener Locktest am SR nur für Komponente 22 zu Komponente 17	o		M. Mustermann	Ber2M260
101000	Teilesatz Komponente 23	verschmutzt auf Teilesatz	B	2	10	1		V	geplanterfalls durch Anlieferung als Band	x		Herr Beispiel	Ber3WE
101000	Teilesatz Komponente 24	verschmutzt auf Teilesatz	2	10	1			V	Anlieferung ohne Prüfl	x		Herr Beispiel	Ber3WE
101010	Komponente 13 Dichtung	verschmutzt	2	10	1			V	Komponente 24 an Teilesatz lagern, dass kein Öl austritt (Erwägungsbilder)	x		T. Mustermann	Ber3WE
101020	Komponente 13	Spänerückstände (TeCSa)	3	4	10	5		V	Verpackung mit schoenoptimiertem Material = reduzierte Stückzahl	o		Patrick Mustermann	Ber3WE
101040	Komponente 42 Dichtung	nicht in Nut	B	5	10	1		V	Verpackung mit schoenoptimiertem Material + reduzierte Stückzahl	o		Patrick Mustermann	Ber3WE
101060	Komponente 42 Schraubbüchse unvollständig verpresst	unvollständig verpresst	4	10	1			V	Verbesserung der Haftung durch neues, umlaufendes Profilsystem	x		Axel Mustermann	Ber3WE
101070	Komponente 10	Position nicht 45° nach OT	A	6	10	1		V	konstruktive Änderung der Haube, Zwischensteg zwischen Büchse und Nut	x		Axel Mustermann	Ber3WE
101070	Komponente 10	Position nicht 45° nach OT	A	6	10	1		V	Anlieferposition der Komponente 10 prüfen bzw. definieren: neu ausrichten	x		Fridolin Mustermann	Ber3WE
101080	Teilesatz Kette	vertauscht	A	5	10	1		V	neu ausrichten	x		Fridolin Mustermann	Ber3WE
101090	Teilesatz Komponente 45	vertauscht	7	1	1			V	An Beginn der Montage wird Komponente 17 positioniert	o		Herr Beispiel	Ber3WE
101100	Teilesatz Komponente 46	vertauscht	7	1	1			V	Definition Pok-Prozess	o		Herr Beispiel	Ber3WE
101110	Teilesatz Komponente 27	vertauscht	7	1	1			V	Definition Pok-Prozess	o		Herr Beispiel	Ber3WE
101130	Teilesatz Komponente 24	vertauscht	2	10	1			V	Definition Pok-Prozess	o		Maria Musterfrau	Ber3WE
101130	Teilesatz Komponente 24	vertauscht	2	10	1			V	Definition Pok-Prozess	o		Maria Musterfrau	Ber3WE

Abbildung 43 Maßnahmenliste

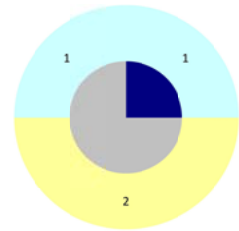
Die Maßnahmen können in einer verdichteten Darstellung (Abbildung 44) als Diagramm dargestellt werden. Die aufsummierten Werte der Maßnahmenklassen (bereits umgesetzt, in Umsetzung, geplant oder

verworfen) wie Abweichungs- und Konformitätskosten, Fehlerzahlen oder Veränderung der Werte für die fixen und proportionalen Fertigungskosten (leistungsmengeninduzierte und leistungsmengenneutrale Kosten) werden im Überblick dargestellt.

Durchgängige Prüfkette

Ergebnisse

Massnahmen aus FPM



				Potenzialabschätzung				
				Delta Auftritt/a	Delta Durchlauf/a	Invest [T€]	FKfix [T€/a]	FKprop [T€/a]
Erweiterungen von Prüfoperationen	1		0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			1	-125	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
Zusätzliche Prüfungen	0		0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
Entfall von Prüfungen	0		0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
Fehlervermeidung	3		0	0	0	0	0	0
			2	-4038	-4013	0	0	0
			1	-50	-12	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
Summe Massnahmen	4	verworfen	0	0	0	0	0	
		in Klärung	2	0	0	0	0	

Abbildung 44 verdichtete Massnahmandarstellung

4.4 Erweiterung der informationstechnischen Umsetzung zur Web-Applikation

Die Umsetzung der neuen Methodik mittels einer Tabellenkalkulation bietet für eine umfassende Optimierung des Montageprozesses alle notwendigen Möglichkeiten. Da mit den gängigen Softwareprodukten nach aktuellem Stand der Technik eine Anbindung an eine Datenbank leicht möglich ist, ist eine kurze Betrachtung der sich durch dadurch bietenden, erweiterten Möglichkeiten lohnend. Unter anderem sind dies:

- Auswertungen über verschiedene Projekte beziehungsweise über die Zeit werden möglich.
- Gezielte Recherchen bezüglich spezifischer Komponenten bzw. Lieferanten sind möglich.
- Integration in ein CAQ-System (Computer-Aided-Quality) wird möglich (Prüfungen, Prüfplanung, Fehlerauswertungen, Lieferantenbewertung).
- Ein (jederzeitiges) Erstellen von Momentaufnahmen in der Analyse wird möglich mit damit verbundener, drastischer Erhöhung der Verfügbarkeit der Daten.
- Die Auswirkungen von geänderten Produktionszahlen auf die absolute Zahl der Fehler und natürlich der Fehlerkosten können simuliert werden.
- Die Maßnahmenverfolgung kann an ein zentrales System verlagert werden.
- Ein mobiler, weltweiter Zugriff auf die Daten wird möglich (Webservice).

Dazu muss zunächst ein Datenmodell definiert werden, das die logischen Zusammenhänge der Informationen in der Tabellenkalkulation berücksichtigt.

Im ER-Modell in Abbildung 45 spiegelt sich die Matrixstruktur der neuen Methode in zwei wesentlichen Entitäten wieder, der Tabelle „Prozessschritt“, deren Tupel die Prozessschritte der Matrix in horizontaler Richtung darstellen, und der Tabelle „Fehler“, deren Tupel die Fehler darstellen. Die Matrixzellen, die das Auftreten beziehungsweise die Entdeckung eines Fehlers anzeigen, werden durch die Tabellen „Auftreten“ und „wird entdeckt“ abgebildet. Diese Tabellen – es handelt sich um „weak entities“ – verbinden Prozessschritt und Fehler durch die Referenz auf die primären Schlüssel der jeweiligen Tabellen, „Fehler“ und „Prozessschritt“.

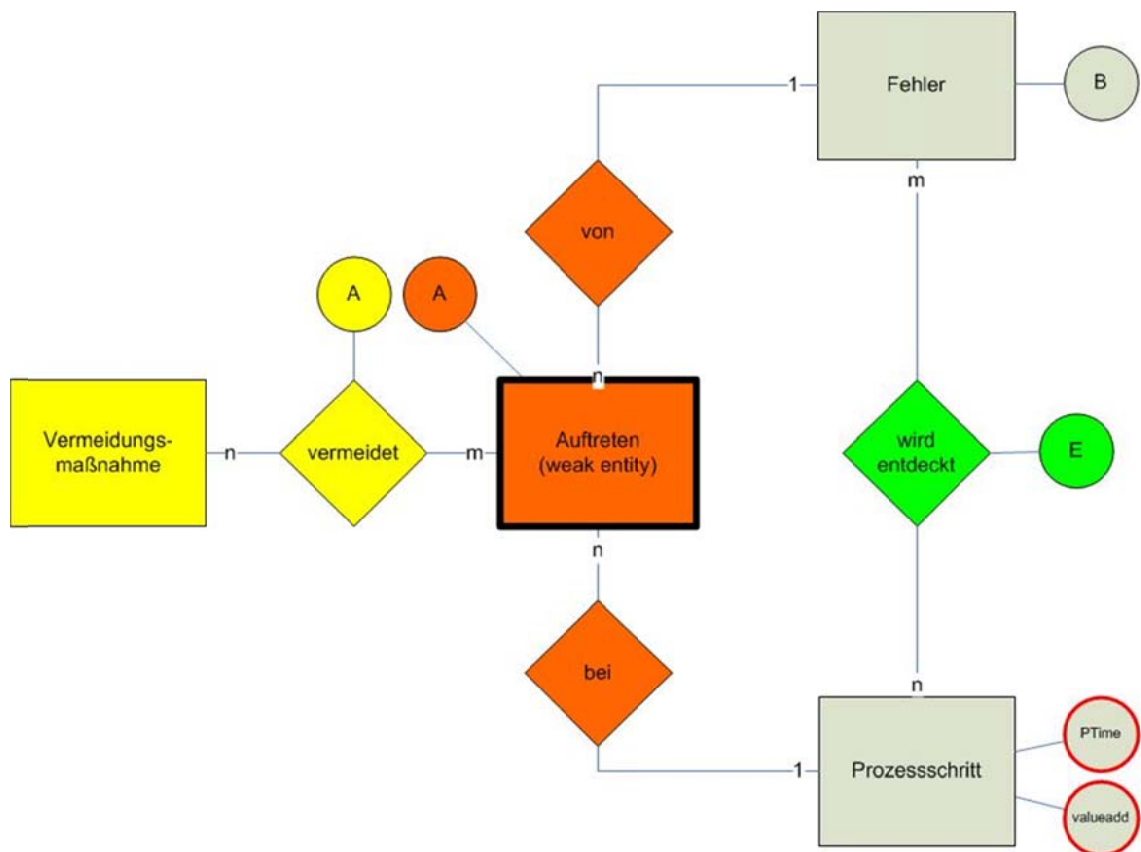


Abbildung 45 Entity-Relationship-Diagramm der FPM-Datenbank

Damit ist gewährleistet, dass Vermeidungsmaßnahmen nur möglich sind, wenn in einem Prozessschritt tatsächlich ein Fehler auftritt. Die Attribute „PTime“ und „valueadd“ der Entität „Prozessschritt“ identifizieren die zeitliche Reihenfolge und die Stationen mit Prüfungen (durch „valueadd=0“), das Attribut „B“ der Entität „Fehler“ erlaubt die Bewertung der Auswirkung des Fehlers, siehe dazu auch den Katalog in Tabelle 6. Entsprechend werden die Werte für die Auftretenswahrscheinlichkeit der Tabelle „Auftreten“ und die der Entdeckungswahrscheinlichkeit der Tabelle „wird entdeckt“ zugeordnet. Die Vermeidungsmaßnahmen werden mittels einer n zu m Beziehung dem Fehlerauftritt zugeordnet, so dass auch Konstellationen wie „eine Maßnahme wirkt auf mehrere Fehler“ dargestellt werden können.

4.4.1 Zugriff über das World-Wide-Web

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, bieten sich durch die Speicherung der FPM-Analyse-Daten in einer Datenbank zusätzliche Vorteile. Einer dieser Vorteile ist die Möglichkeit, ortsunabhängig mittels mobiler Geräte jederzeit auf Auswertungen der FPM-Daten zugreifen zu können.

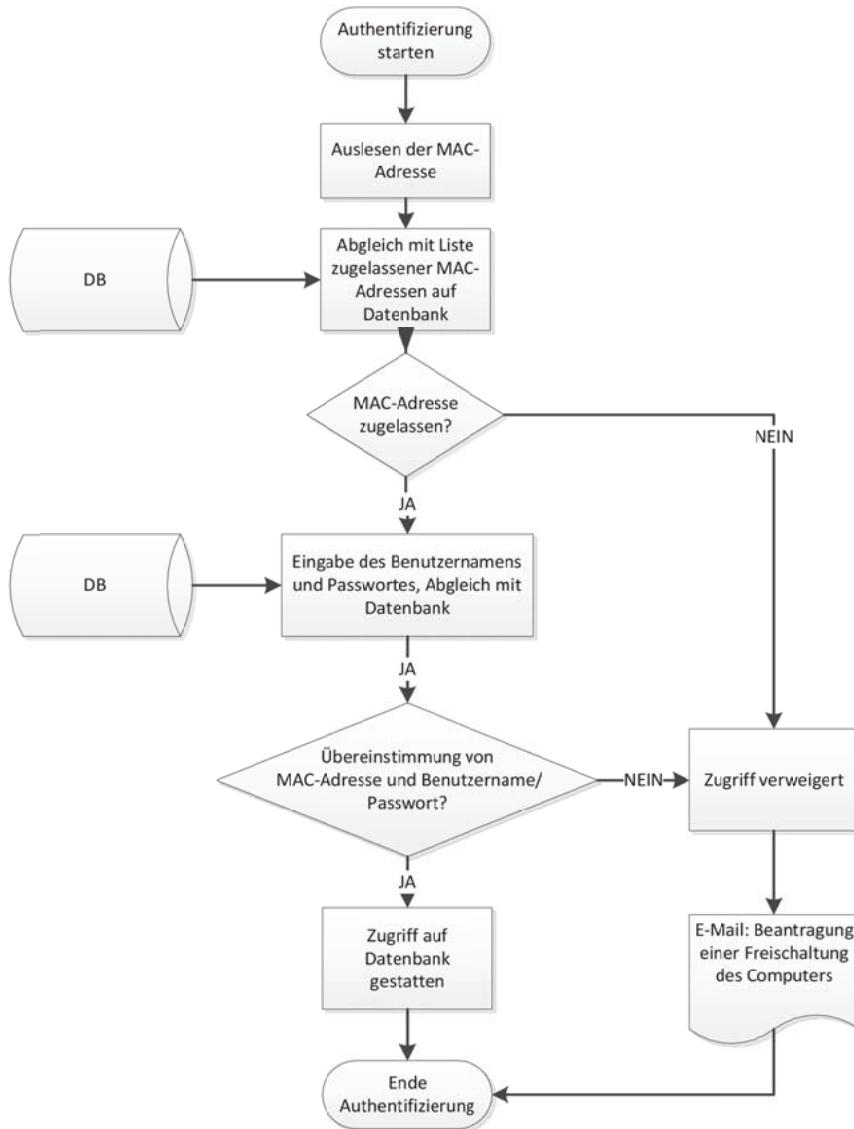


Abbildung 46 Zwei-Faktor-Authentifizierung der FPM-Datenbank nach (Bader 2012)

Diese Daten stellen – besonders für Wettbewerber – interessante Informationen dar, und werden so zu einem bevorzugten Ziel für Betriebsspionage. Zur Absicherung des Zugriffs auf diese Informationen

wird ein Zwei-Faktor-Mechanismus verwendet, der ausreichenden Schutz gegen Angriffe bietet, gleichzeitig aber keine zu hohen Hürden im Hinblick auf Bearbeitungszeiten von Anträgen für Datenzugriff aufbaut. In Abbildung 46 ist der Ablauf dieser Authentifizierung dargestellt. Ein zweiter, möglicher Angriffspunkt ist der Weg der Daten vom Client zum Webserver. Hier wird die bewährte verschlüsselte Verbindung eingesetzt, die bei sicheren Webanwendungen wie bei Onlineshops oder beim Onlinebanking Stand der Technik sind.

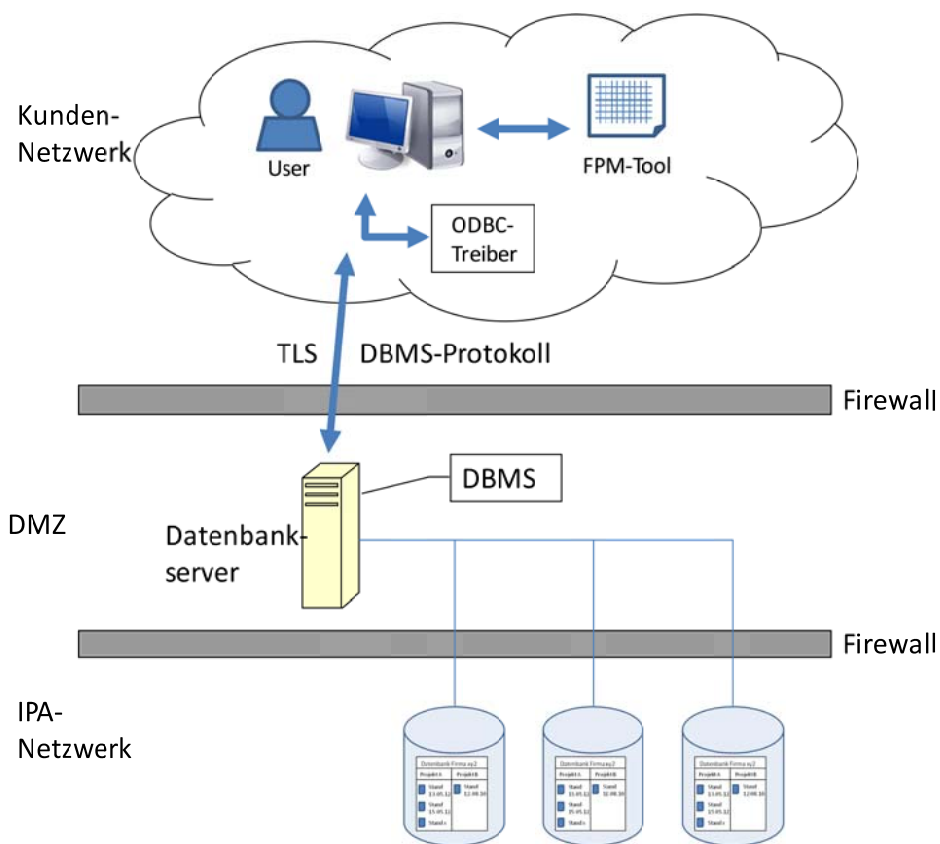


Abbildung 47 Architektur FPM-Webservice (Bader 2012)

Das Web-Interface bietet – neben der oben erwähnten Möglichkeit, Auswertungen abzurufen – auch die Möglichkeit, der Maßnahmenpflege, d.h. die Verantwortlichen der definierten Maßnahmen können den Bearbeitungsstatus ändern oder auch ihre Arbeitsliste abfragen.

4.4.2 Sicherstellen der Datenverfügbarkeit

Die bisher beschriebene Datenbankanwendung bietet die Möglichkeit, Auswertungen und kleine Simulationsrechnungen (Wie würden sich die Konformitäts- und Abweichungskosten verändern, wenn Test X abgeschaltet wird?) durchzuführen. Das führende System bleibt dabei jedoch die Tabellenkalkulation. Durch die Ergänzung des Datenmodells aus Abbildung 45 um eine Komponente zur zeitlichen Identifikation der Speicherung¹⁶ wird es möglich, die Tabellenkalkulation als flexibles¹⁷ Bearbeitungsinstrument einer Datenbankanwendung zu betrachten. In der Tabellenkalkulation wird mittels anwendungsspezifischer Programmierung das Erstellen einer aktuellen Momentaufnahme („snapshot“) des Datenbestandes ermöglicht.

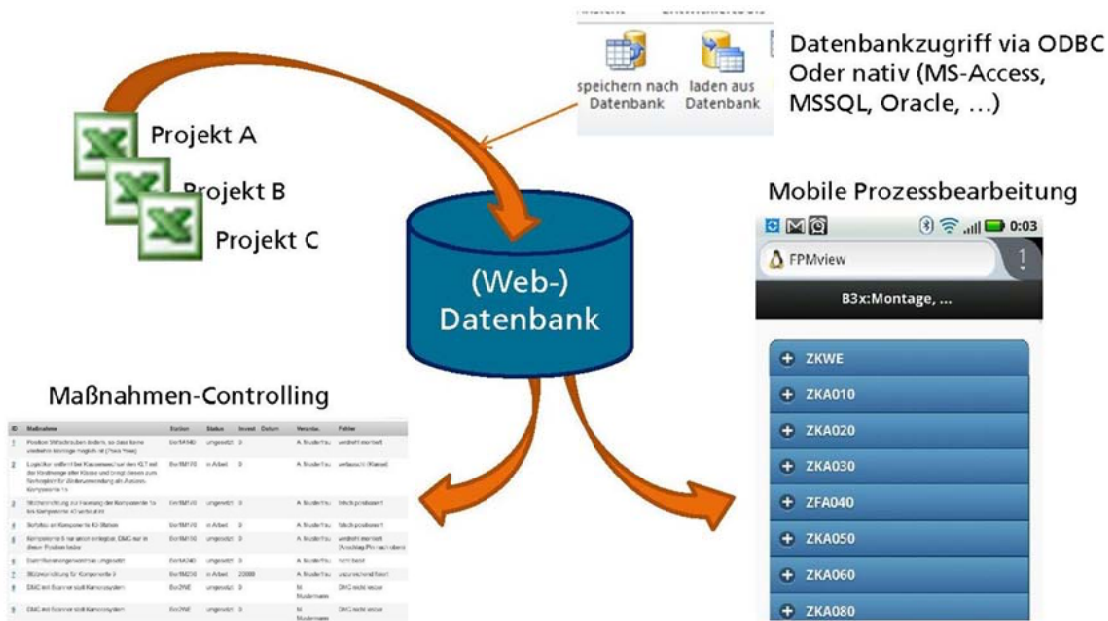


Abbildung 48 Überblick WebFPM

¹⁶ Dies wird datenbanktechnisch durch Erweiterung der Primärschlüssel (fid, pid, ...) zu zusammengesetzten Schlüssel mit einer Schlüsselkomponente (sid) erreicht.

¹⁷ Durch die Verwendung der „snapshot-ID“ sid ist ein paralleles, off-line Erfassen von Daten des gleichen Prozesses möglich. Diese Daten müssen später selbstverständlich zusammengeführt werden.

Diese Momentaufnahme wird sofort im Web sichtbar und bearbeitbar. Bei Bearbeitung wird die entsprechende Momentaufnahme mit einem Zeitstempel markiert. Bei Erstellen einer neuen Momentaufnahme in der Tabellenkalkulation wird erst geprüft, ob im Web modifizierte Daten vorhanden sind und ein Abgleich angeboten.

4.4.3 Verteilte Bearbeitung der FPM-Daten

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten, die sich aus der IT-technischen Erweiterung der FPM-Methodik ergeben, in der direkten Anwendung gezeigt. Da aktuelle Mobiltelefone und Tablets über Standard-Webbrowser verfügen, ist so der Zugriff auf die FPM-Daten auch direkt in der Montagelinie möglich.



Abbildung 49 Darstellung der Prozessschritte

Die Darstellung der Prozessschritte (Abbildung 49) erfolgt dabei in „Ziehharmonika-Technik“ (englisch: „collapsible style“), so dass der Überblick über die Stationen gewahrt bleibt, und trotzdem durch Berühren der Station sofort und ohne Verzögerung die Arbeitsschritte innerhalb dieser Station und potentielle Fehler (inklusive Fehlerereignisse pro Jahr und Entdeckungsort) angezeigt werden. Eine Berührung des Arbeitsschrittes zeigt die weiteren Details zur Bearbeitung (Abbildung 50). Hier sind nun Anpassung der vorhandenen Daten möglich.

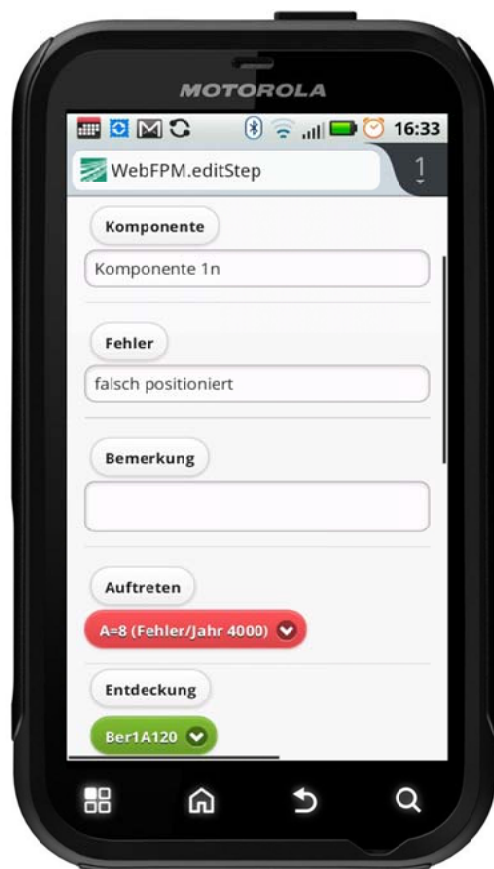
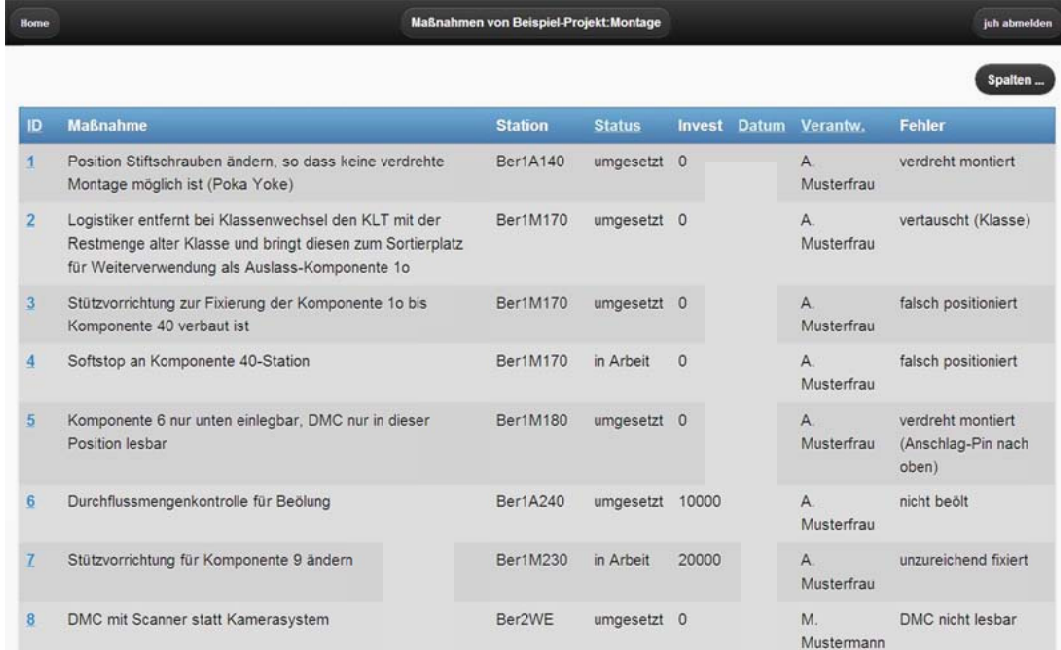


Abbildung 50 Bearbeitung der Daten des Prozessschrittes

4.4.4 Maßnahmenmanagement

Durch die Verfügbarkeit der FPM-Daten im Web wird die gleichzeitige und verteilte Bearbeitung der Maßnahmen möglich, dies betrifft insbesondere die Status-Rückmeldungen der Maßnahmenverantwortlichen. Dieser Zugriff wird in der Regel vom normalen (Büro-)Arbeitsplatz erfolgen. Abbildung 51 zeigt die Darstellung im Webbrowser. In dieser Darstellung

kann nach beliebigen Spalten sortiert werden, so können schnell Listen mit Maßnahmen eines Verantwortlichen oder von Maßnahmen mit einem bestimmten Status erstellt werden. Abbildung 52 zeigt die Bearbeitung einer Maßnahme im Webbrowser.



ID	Maßnahme	Station	Status	Invest	Datum	Verantw.	Fehler
1	Position Stiftschrauben ändern, so dass keine verdrehte Montage möglich ist (Poka Yoke)	Ber1A140	umgesetzt	0		A. Musterfrau	verdreht montiert
2	Logistiker entfernt bei Klassenwechsel den KLT mit der Restmenge alter Klasse und bringt diesen zum Sortierplatz für Weiterverwendung als Auslass-Komponente 1o	Ber1M170	umgesetzt	0		A. Musterfrau	vertauscht (Klasse)
3	Stützvorrichtung zur Fixierung der Komponente 1o bis Komponente 40 verbaut ist	Ber1M170	umgesetzt	0		A. Musterfrau	falsch positioniert
4	Softstop an Komponente 40-Station	Ber1M170	in Arbeit	0		A. Musterfrau	falsch positioniert
5	Komponente 6 nur unten einlegbar, DMC nur in dieser Position lesbar	Ber1M180	umgesetzt	0		A. Musterfrau	verdreht montiert (Anschlag-Pin nach oben)
6	Durchflussmengenkontrolle für Beölung	Ber1A240	umgesetzt	10000		A. Musterfrau	nicht beölt
7	Stützvorrichtung für Komponente 9 ändern	Ber1M230	in Arbeit	20000		A. Musterfrau	unzureichend fixiert
8	DMC mit Scanner statt Kamerasystem	Ber2WE	umgesetzt	0		M. Mustermann	DMC nicht lesbar

Abbildung 51 Maßnahmenübersicht im Webbrowser

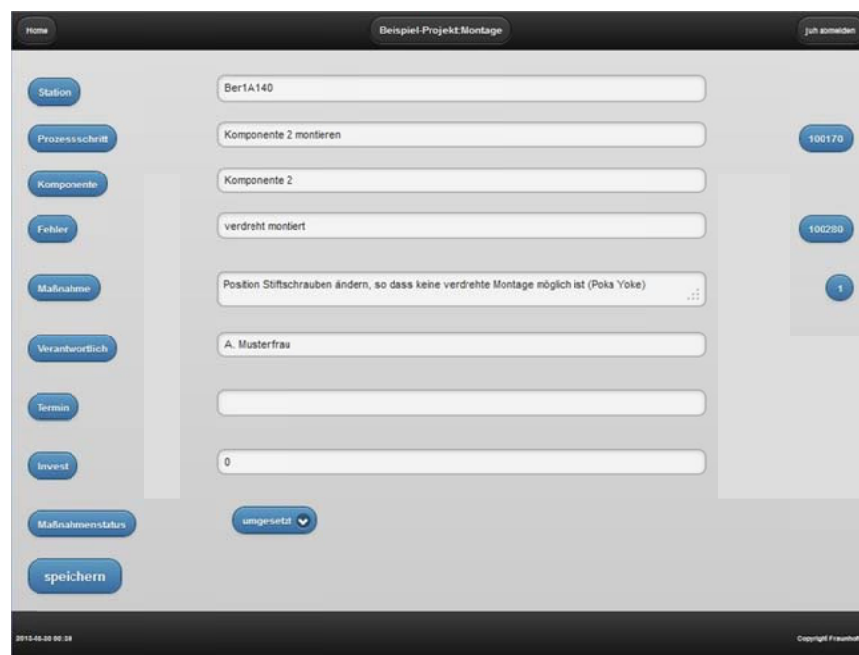


Abbildung 52 Maßnahmenbearbeitung im Webbrowser

5 Bewertung und Validierung der neuen Methodik

5.1 Unsicherheit der neuen Methodik durch die Nutzung von Erfahrungswerten

Sämtliche Bewertungen, die bei der neuen Methodik vorgenommen werden, sind Schätzwerte, d.h. das Team versucht bestmöglich die eigenen Erfahrungswerte auszudrücken. Wie bei allen durch Schätzung gewonnenen Werten muss sorgfältig geprüft werden, wie plausibel die Werte sind. Im folgende soll die Gefahr, dass es zu Fehleinschätzungen kommen kann, abgeschätzt werden. In Tabelle 9 sind plausible Abweichung von den Schätzwerten des erweiterten Bewertungskatalogs aufgeführt.

Auftreten / schichtbezogen	Faktor obere Abweichung	Kommentar zur oberen Abweichung	Faktor untere Abweichung	Kommentar zur unteren Abweichung
Jede Einheit	1	Mehr Fehlteile als gefertigte Teile ist nicht möglich	0,7	deutlich weniger als jede Einheit
Jede zweite Einheit	1,75	weniger als jede Einheit, aber mehr als deren untere Abweichung	0,5	statt jeder 2. jede 4. Einheit
jede fünfte Einheit	2		0,4	
Jede zehnte Einheit	2,5	so gewählt, dass sich eine Überschneidung mit der unteren Abweichung jeder zweiten Einheit ergibt; große Abweichung, da seltenstes Ereignis der stückbasierten Auftretensarten	0,3	jede 10. Einheit kann schon relativ selten und stochastisch schwer nachvollziehbar sein, daher relativ große Abweichung
Jede 20. Einheit	3	Keine gebräuchliche Angabe – großer Faktor gleicher Schätzfehler wie bei jede 10. Einheit (ähnlich große Anzahl Fehlteile bei den gewählten Randbedingungen)	0,2	Keine gebräuchliche Angabe – kleiner Faktor
Dreimal/Stunde	2,5	relativ gut abschätzbar, daher kleiner Schätzfehler	0,35	beinahe einmal / Stunde
Einmal/Stunde	2		0,4	
Fünfmal/Schicht	2		0,5	
Zweimal/Schicht	2	für den Werker wohl am besten abschätzbares Auftreten, daher kleinster Schätzfehler	0,6	für den Werker wohl am besten abschätzbares Auftreten, daher kleinster Schätzfehler
Einmal/Schicht	2	für den Werker wohl am besten abschätzbares Auftreten, daher kleinster Schätzfehler	0,6	für den Werker wohl am besten abschätzbares Auftreten, daher kleinster Schätzfehler
Einmal/Tag	2,5	Achtung: einmal/Tag kann leicht mit einmal/Schicht verwechselt werden	0,5	Achtung: nicht zu verwechseln mit einmal/Schicht
Dreimal/Woche	2	da selten vorkommende und mitunter lange zurückliegende Ereignisse leichter falsch eingeschätzt werden steigt die obere Abweichung in dieser Spalte nun stetig an (Schätzfehlerfaktor wird größer)	0,33	da selten vorkommende und mitunter lange zurückliegende Ereignisse leichter falsch eingeschätzt werden sinkt die untere Abweichung in dieser Spalte nun stetig (Schätzfehler wird größer)
Einmal/Woche	2	Die folgenden Faktoren gehören zu sehr seltenen Ereignissen, daher wird der Faktor von nun an schrittweise immer größer (da seltener und damit schlechter einzuschätzen)	0,33	Die folgenden Faktoren gehören zu sehr seltenen Ereignissen, daher wird der Faktor von nun an schrittweise immer kleiner (da seltener und damit schlechter einzuschätzen)
alle zwei Wochen	2		0,3	
Einmal/Monat	2,5		0,3	
Zweimal/Quartal	2,5		0,3	
Einmal/Quartal	3		0,25	
Zweimal/Jahr	3		0,2	
Einmal/Jahr	3,5		0,2	

Tabelle 9 mögliche Schätzfehler

Zur vereinfachten Behandlung der möglichen Abweichungen kann Gleichung (5.1) verwendet werden, die jeweils das halbe Intervall zum nächst höheren oder nächst niedrigeren Wert verwendet. Die Abweichungen gegenüber den mittels Tabelle 9 ermittelten Toleranzwerten ist unter realen Bedingungen vernachlässigbar.

$$\Delta(P_n) = \frac{P_{n+1} - P_n}{2} \quad (5.1)$$

In Abbildung 53 sind die so abgeschätzten Abweichungen dargestellt. Den starken Abweichungen für die stückzahlbasierten Bewertungen kann durch geeignete Wahl der Bewertungsstufen aus dem erweiterten Katalog (Tabelle 7) begegnet werden.

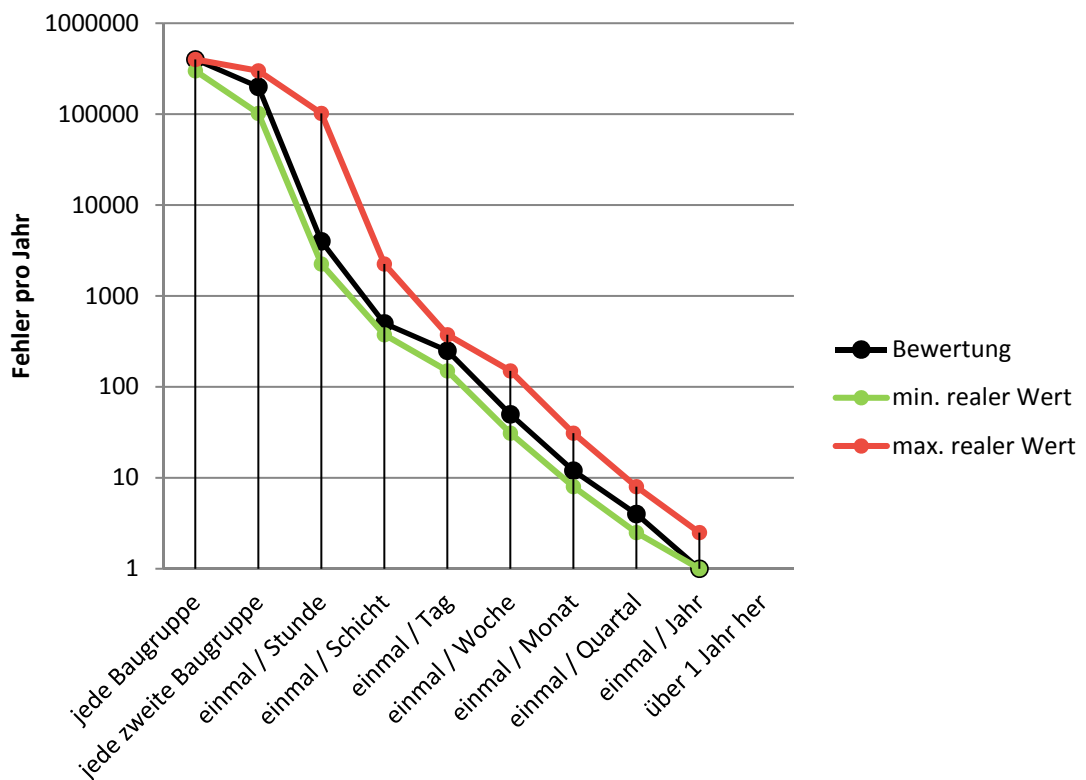


Abbildung 53 mögliche Abweichungen der prognostizierten Fehlerzahlen

In Abbildung 54 sind die möglichen Abweichungen der realen Fehlerzahlen von den tatsächlichen für die unteren Stufen des erweiterten Bewertungskatalogs dargestellt.

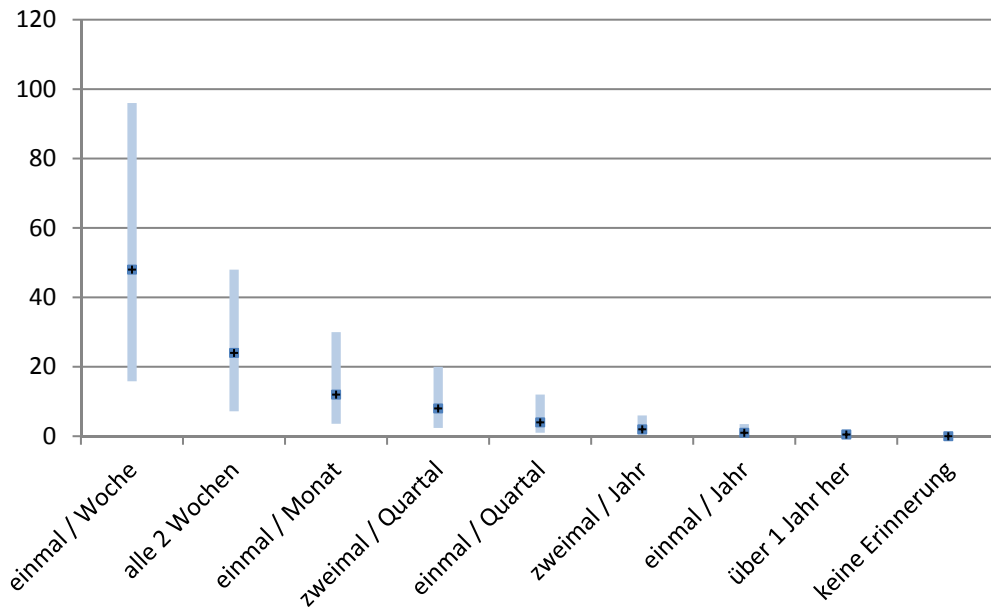


Abbildung 54 potentielle Abweichungen der Fehlerzahlen für niedrige Bewertungsstufen

5.2 Validierung der neuen Methodik

Die neue Methodik wurde das erste Mal für die Validierung an einer bestehenden Montagelinie eines Diesel 4-Zylinder-Motors eingesetzt. Die Analyseergebnisse wurden mit den Aufzeichnungen bezüglich Fehler und dadurch verursachten Nacharbeitsaufwänden abgeglichen. Die Methodik wurde dann – nicht zuletzt durch die sehr guten Ergebnisse bei der bestehenden Linie – bei der Planung der Montage des Nachfolge-Motors das erste Mal produktiv eingesetzt.

5.2.1 Vor-Pilotanwendung Dieselmotoren-Montageband

Die betrachtete Montagelinie gliedert sich in 4 Abschnitte, die jeweils in sich abgeschlossen organisiert sind – die Werker wechseln Stationen normalerweise nur innerhalb eines Abschnittes. In Abbildung 55 sind die

Abschnitte (Gruppen) und die jeweils montierten Hauptkomponenten dargestellt.

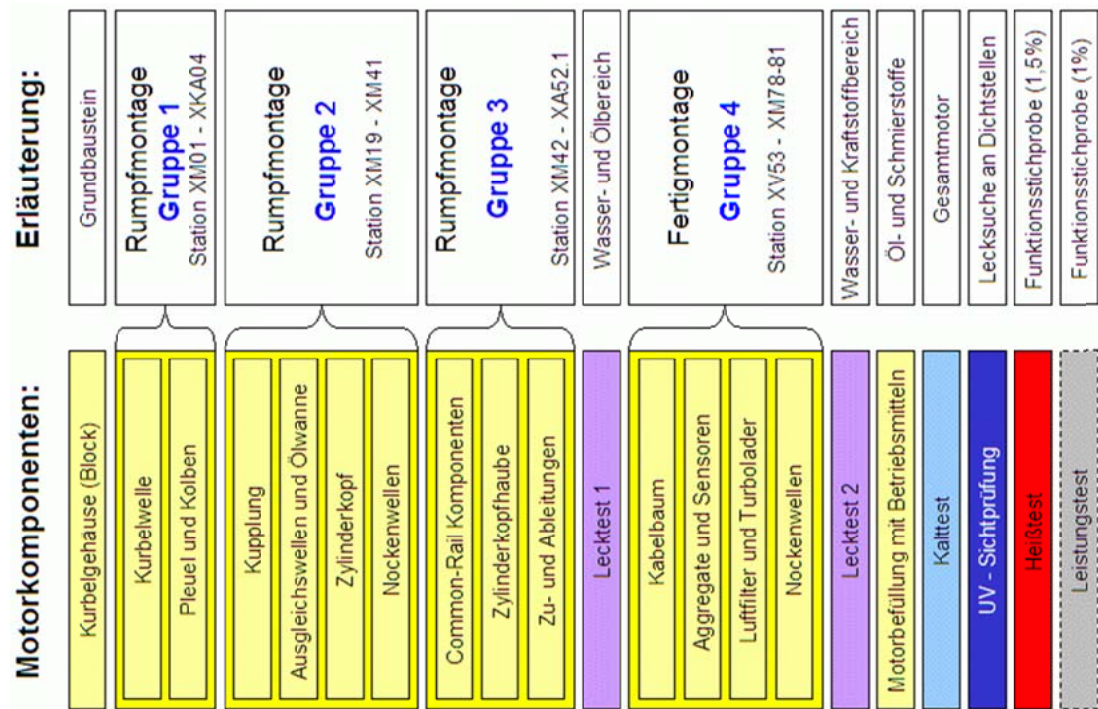


Abbildung 55 Fertigungsbereiche der Montagelinie (Albrecht 2005)

Der Ausbildungsstand der Werker entspricht der Darstellung in Kapitel 2, trotzdem dauerte es in der Regel nur wenige Minuten, bis die Werker das Prinzip verstanden hatten, und wertvolle Inhalte zum Fehleregeschehen beitragen konnten.¹⁸

Die Ergebnisse der Analyse der Montagelinie wurden aufbereitet und mit den Fehlerdokumentations-(FEDOK)-Aufzeichnungen (Steyr 2004) verglichen. Im Folgenden werden zwei exemplarische Beispiele aufgeführt:

¹⁸ Die FMEA-Schulungen namhafter Anbieter (DGQ, SPA, APIS) dauern in der Regel zwei Tage.

Fehler: Kurbelwelle / Lagerschalen verschmutzt / verölt

FPM: Auftritt in XA07, Entdeckung in XA09.

A=9; E=3

-> **283 betroffene Motoren / Jahr**

FEDOK:

-> **330 Motoren / Jahr**

Fehler: Ölspritzdüse beschädigt / deformiert

FPM: Auftritt in XA05, Entdeckung „KEINE“.

A=10; E=10 (Korrelation -> 8)

-> **850 Motoren / Jahr**

FEDOK

Die Diskrepanz zwischen FPM und FEDOK wurde durch einen Abgleich mit Gewährleistungsfällen bestätigt, es konnten diesem Fehler entsprechende Schadensbilder im Feld in erheblichem Umfang zugeordnet werden.¹⁹

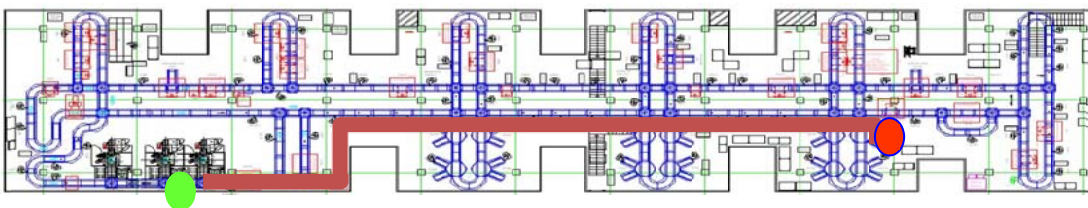


Abbildung 56 Darstellung der Entdeckungsdistanz im Layout

¹⁹ Die – bei Gewährleistungsfällen – oft schwer zuordenbare Fehlerursache ist hier ausnahmsweise klar erkennbar, das Fehlerbild wird in der Regel ein durchgebrannter Kolbenboden aufgrund der nicht ausreichenden Spritzkühlung sein.

5.2.2 Vergleich von FPM- und FEDOK-Daten

Da die Daten zur Nacharbeit mittels des Softwaretools FEDOK (Steyr 2004) durch freie Eingaben erfasst werden, d.h. es ist kein standardisierter Fehlerkatalog hinterlegt, musste der vollständigen vergleichenden Analyse von FEDOK und FPM erst eine Klassifizierung der Fehlerdokumentation vorangehen. Die Fehler- bzw. Nacharbeitsdaten liegen in FEDOK in folgender Form vor:

Name	Type	Size	Description
ID	Long Integer	4	
Entdeckungsort	Text	255	Stationsbezeichnung
Motor-Typ	Text	255	
Motor-Nr	Double	8	
GVAR	Text	255	
Bauteilcode	Double	8	
Bauteil	Text	255	
Befundcode	Double	8	
Befund	Text	255	
Kostenstelle	Text	255	
Verursacher	Text	255	
NA-Zeit	Text	255	[Stunden]
ign	Double	8	
anz	Double	8	
wid	Double	8	
Eingabeort	Text	255	
Eingabe MA	Text	255	
Datum	Text	255	
Bemerkungen	Text	255	
Aktion	Text	255	

Abbildung 57 Attribute der FEDOK-Datenbank

In der folgenden Tabelle sind die Fehlerklassen dargestellt, die zur Auswertung verwendet wurden. Die originär aus dem Montageprozess stammenden Fehlerklassen sind hervorgehoben.

Bearbeitungsfehler	beschreiben solche Fehler, die durch falsche Bearbeitung entstanden sind, wie z.B. zu viele Bohrungen, unfertige Bohrungen und vergessene
--------------------	---

Oberfläche n.i.O.	Arbeitsschritte, beschädigte/fehlerhafte Gewinde bei diesen Fehlern ist die Bauteiloberfläche nicht in Ordnung, eine Beseitigung des Oberflächenfehlers ist in der Nacharbeit erforderlich. Beispiele solcher Fehler sind Grate, Kratzer, Riefen.
Gussfehler/Lunker	Komponente weist Porosität, Gussfehler oder Lunker auf, die meist bei der Bearbeitung der Komponente freigelegt wurden.
Verschmutzt/verölt	Die Komponente ist so stark verschmutzt/verölt, dass sie vor weiteren Arbeitsschritten gereinigt werden muss.
Beschädigt	Beschädigung, die nicht eindeutig auf eine Montagetätigkeit zurückzuführen ist bzw. nicht direkt einem Verursacher zuzuordnen ist, wie z.B. Deformationen und Risse.
Montageschaden	die Beschädigung der Komponente ist eindeutig einer Montagetätigkeit zuzuordnen und ist als solche in der FEDOK dokumentiert, z.B. eingeklemmte Dichtungen, beschädigte (verriessene) Gewinde oder gebrochene/abgerissene Befestigungselemente.
Fehlerhafte Montage	Der Werker hat eine Komponente falsch oder fehlerhaft montiert, jedoch ohne eine Beschädigung der Komponente zu verursachen. Beispiele hierfür sind: nicht angesteckte / verrastete Stecker oder schief montierte Komponenten.
Nicht montiert/demontiert	Die Montage bzw. Demontage von Bauteilen/Komponenten wurde vergessen wie z.B. Schrauben, Muttern oder Passhülsen. Aber auch die vergessene Demontage von Rüstteilen.
Montageprobleme	Es erfolgte eine Ablaufstörung der Montage und der Arbeitsschritt musste Stand-by oder in Nacharbeit durchgeführt werden. Gründe sind z.B. das Klemmen einer Verschraubung oder Andockprobleme von Bauteilen.
Verschraubung n.i.O.	Die Verschraubung ist nicht in Ordnung, z.B. lose Verschraubungen (nur geheftet).
Undicht	Der Motor / die Komponente weist Undichtigkeiten auf, dessen Grund ist nicht weiter spezifiziert. Bsp.: undichte

Fremdkörper	Hochdruckleitung oder undichte Injektoren, aber auch z.B. Porositäten der Gussteile. Es befinden sich Fremdkörper auf einer Komponente oder dem Motor wie z.B. Späne, aber auch Montageteile (Schrauben, Muttern etc.), die in den Motor gefallen sind.
Falsche Komponente	Es wurde eine falsche Komponente bzw. Montageteil verbaut, z.B.: falsche Schrauben, Komponente eines anderen Motoren-Typs.
Korrosion	Das Bauteil weist rostige/korrodierte Stellen auf.
Bauteil/Komponente n.i.O.	beschreibt Fehler, die nicht weiter spezifiziert sind wie z.B. „Dichtring n.i.O.“ oder Funktionsfehler. Sonderfälle sind Barcodes und Motornummern, die als Barcode n.i.O. und Motornummer n.i.O. bezeichnet werden.
Logistik Fehler	Treten auf, wenn eine falsche Komponente bereitgestellt wurde bzw. wenn eine Komponente falsch aufgelegt wurde oder die Komponente an eine falsche Station geschickt wurde, z.B. an die falsche Nacharbeitsstation.
Logistik Schaden	Beschreibt einen Schaden, der bei dem Transfer zwischen den Stationen entstanden ist.

Tabelle 10 Fehlerklassen zur Analyse von Fehleraufzeichnungen

Betrachtet man die gesamte Abweichung zwischen prognostizierten und dokumentierten Fehlern, so sind die Prognosen der Werker mit 65% zutreffenden Prognosen, die als gut und sehr gut bewertet wurden, schon sehr zufriedenstellend, der Gesamtwert von 89% mindestens befriedigend zutreffender Prognosen jedoch ein deutlicher Beweis, dass durch diese Methodik das – zum Teil nur implizit vorhandene - Prozesswissen der Werker hervorragend genutzt werden kann²⁰. Des Weiteren ist auffällig,

²⁰ Die Güte der Schätzwerte der Werker überrascht nicht, wenn man die Ergebnisse von Francis Galton aus dem Jahr 1907 (!) berücksichtigt. Herr Galton hat damals 900 Teilnahmescheine einer Lotterie, bei der das Gewicht eines Ochsen geschätzt werden sollte, ausgewertet – mit dem

dass die größeren Abweichungen überwiegend bei Fehlern auftreten, die sehr kleine Nacharbeitszeiten haben, wie die nicht vollständig eingerasteten Steckverbindungen – hier liegt die Vermutung nahe, dass der Aufwand für die Erfassung den Aufwand für die Behebung des Fehlers von wenigen Sekunden deutlich übersteigt, und deshalb die Erfassung nicht erfolgt. (Schneider 2010)

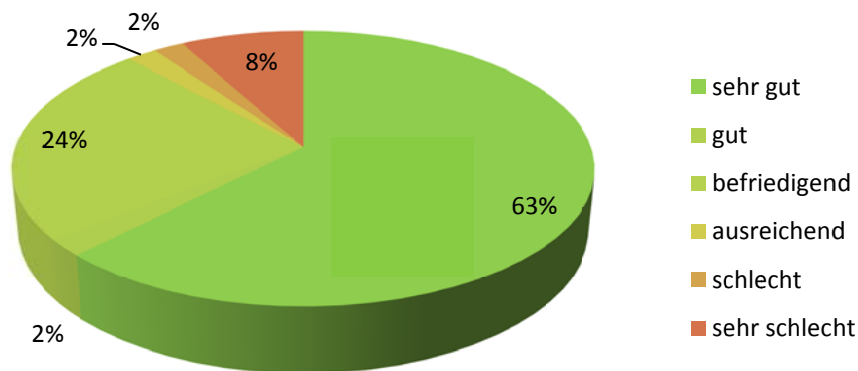


Abbildung 58 Vergleich FPM- und FEDOK-Daten²¹

5.2.3 Vergleich des FPM-Prozess mit dem FMEA-Prozess

Die Prozessstrukturierung bei der FPM erfolgt nicht wie bei der FMEA üblich, in dem zuerst die Struktur der einzelnen Prozessschritte gebildet und in weiteren Durchgängen die Funktionen, Fehlfunktionen und Zusammenhänge zwischen Fehlfunktionen zugeordnet werden.

Ergebnis, dass der Durchschnittswert der Teilnehmer nur 0,8% vom tatsächlichen Gewicht des Ochsen abwich. Galton (1907)

²¹ Sehr gut <= 10% Abweichung, gut <= 15%, befriedigend <= 20%, ausreichend <= 30%, schlecht > 30%, sehr schlecht > 50%

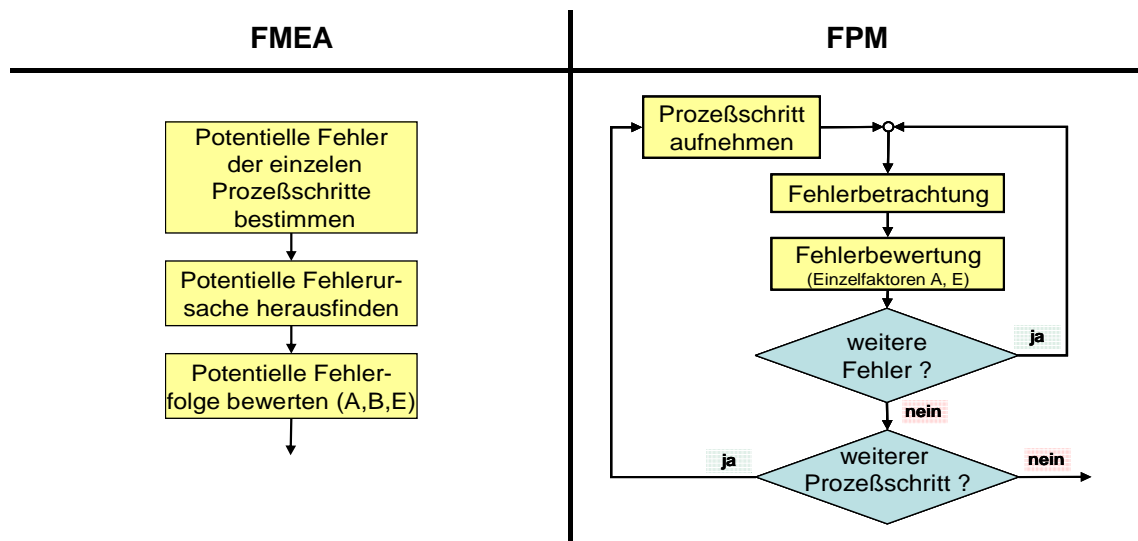


Abbildung 59 Prozessstrukturierung FMEA – FPM (Hagmayer 2006)

Bei der FPM ist es eine wachsende Struktur, hier werden den einzelnen Prozessschritten gleich die möglichen Fehlerarten zugeordnet. Siehe dazu Abbildung 59.

Vereinfacht kann man sagen, dass man für jede Arbeitsstation im betrachteten Montageprozess eine "Mini-Prozess-FMEA" durchführt. Da der Werker – wie weiter oben begründet – die Hauptfehlerquelle darstellt, können die einzelnen Arbeitsstationen tatsächlich als einzelne Herstellprozesse behandelt werden, da in der Regel auch nur ein Werker pro Station eingesetzt wird. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil besteht darin, dass man bereits Zwischenergebnisse liefern kann, obwohl die FPM den Gesamtprozess noch nicht abschließend betrachtet und bewertet hat. Der Unterschied im Ablauf der FPM zur Prozess-FMEA, in welchem sich auch die Schnelligkeit der Durchführung begründet, ist vergleichbar mit dem Unterschied zwischen einer Losgrößenfertigung im Vergleich zum angestrebten One-Piece-Flow. Je größer das Los bei der Losgrößenfertigung ist, desto mehr Teile warten beziehungsweise lagern, bis das Los vollständig abgearbeitet ist. One-Piece-Flow bedeutet eine Losgröße von eins und vermeidet diese Verzögerung, das heißt ein

bearbeitetes Teil wird sofort zur Weiterverarbeitung dem nachfolgenden Prozessschritt zugeführt und sorgt damit für die minimale Durchlaufzeit.

5.2.4 Vergleich der Ergebnisse der FPM mit den Ergebnissen der FMEA

Die neue Methode soll im Bereich der Montageprozesse die etablierte FMEA ersetzen. Dazu muss gezeigt werden, dass durch den Einsatz der FPM gleiche oder bessere Ergebnisse in kürzerer Zeit erzielt werden können. Im Rahmen einer FMEA-Analyse eines Teilbereichs einer Motorenmontage, die aufgrund einer zusätzlichen Variante des Einspritzsystems erforderlich wurde, ergab sich die Möglichkeit, beide Methoden im direkten Vergleich gegenüberzustellen. Für die geänderte Variante waren folgende Prozessschritte zu betrachten:

1. Montage der Injektoren
2. Montage der Hochdruckpumpe (HDP)
3. Montage der Common Rail und der Hochdruckleitungen von der HDP zur Common Rail und von der Common Rail zu den Injektoren
4. Montage der elektrischen Anschlüsse der Injektoren.

Die FMEA wurde nach den Regeln des VDA (VDA-QMC) durchgeführt.

In Abbildung 60 sind diese Arbeitsschritte und Funktionen, also die erwarteten Ergebnisse der Arbeitsschritte dargestellt. Die folgende Analyse der potentiellen Fehlfunktionen und deren Verknüpfung mit potentiellen Fehlerfolgen (für den betrachteten Montageprozess) und potentiellen Fehlerursachen (für die „5M“: Mensch, Maschine, Mitwelt, Material, Methode) wird nach VDA als Fehlernetz dokumentiert.

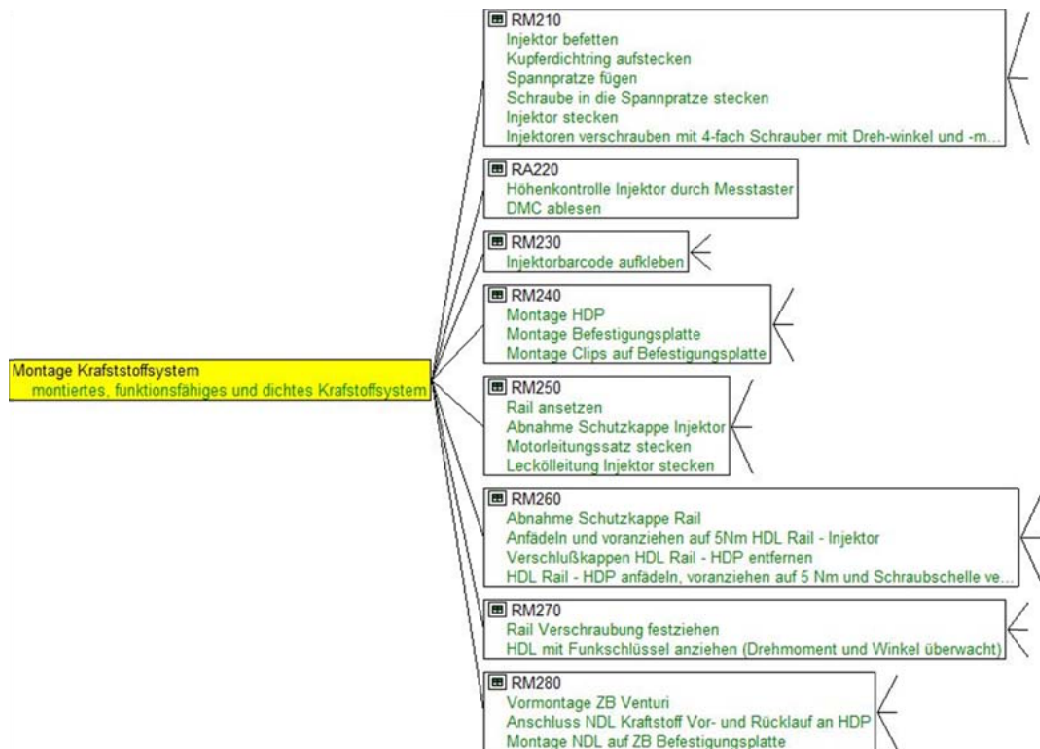


Abbildung 60 Arbeitsschritte und Funktionen in der Vergleichs-FMEA

Abbildung 61 zeigt das Fehlernetz für die Fehlerfolge „Prozessstörung“, die den offensichtlichsten Bezug zu den Ergebnissen der FPM hat.

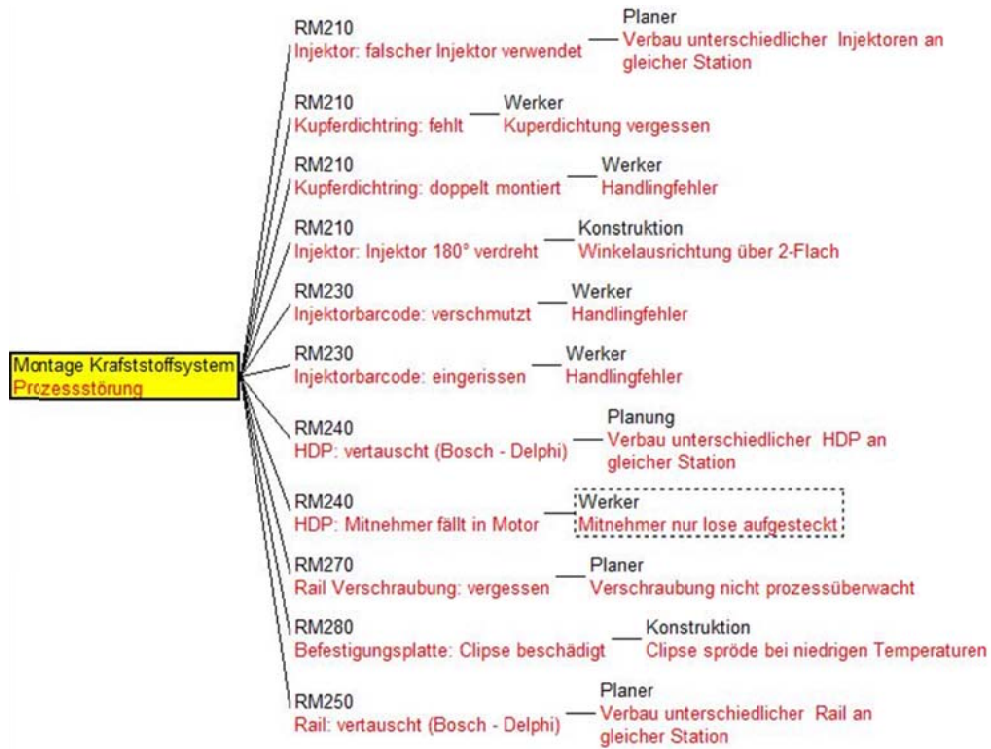


Abbildung 61 Fehlernetz der Vergleichs-FMEA für "Prozessstörung"

Die Darstellung der FMEA-Ergebnisse erfolgt üblicherweise (VDA-QMC) in Form einer Pareto-Analyse der FMEA-Bewertungsparameter. In der Abbildung 62 ist dieses Pareto-Diagramm für die potentiellen Fehler der betrachteten Prozessschritte dargestellt.

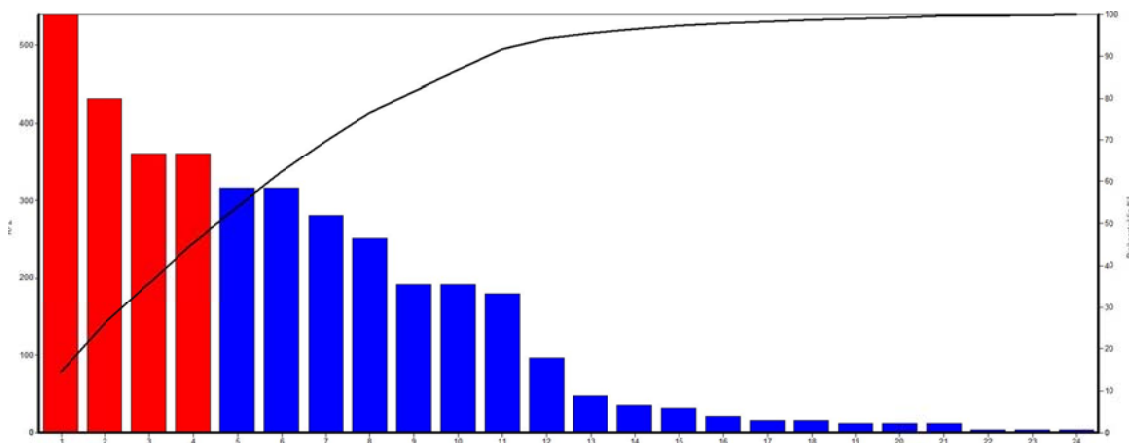


Abbildung 62 Pareto-Diagramm der Montagefehler i.d. FMEA

Die gleichen Arbeitsschritte wurden später nochmals mittels der FPM analysiert. Die Analyse erfolgte dabei mit dem beschriebenen Ablauf. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass durch die zusätzliche Erfassung der Nacharbeitsaufwände eine deutliche Änderung der Priorisierung gegenüber der RPZ-Rangfolge (Abbildung 62) ergibt. In Abbildung 63 sind – entsprechend der RPZ-Reihenfolge – die prognostizierten Nacharbeits- und Ausschusskosten (rote Balken) und die prognostizierten Gewährleistungskosten (blaue Balken) der jeweiligen, entsprechenden Fehler aufgetragen. Die mangelnde Berücksichtigung von Kostenfaktoren in der FMEA wird hier deutlich – der Fehler mit den höchsten prognostizierten Gewährleistungskosten findet sich in der FMEA-Auswertung an Rang 7. Besonders deutlich wird der Unterschied an den Fehlern in den Rängen 22-29, die aufgrund der Kostenprognose der FPM-Analyse klar erkennbar starke Prozessstörungen verursachen, bei der FMEA-Analyse jedoch nachrangig behandelt werden – und damit bei der Maßnahmenfindung innerhalb der FMEA nicht mit der gebotenen Priorisierung behandelt werden.

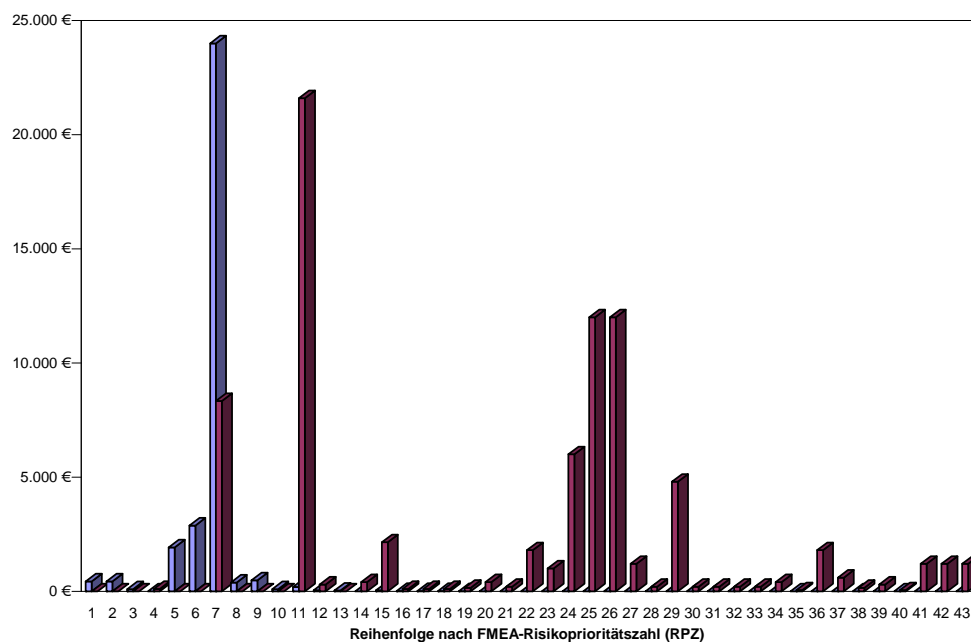


Abbildung 63 RPZ-Priorisierung der FMEA

5.2.5 *Ergebnis der Validierung*

Die Methodik liefert als Ergebnis die zu erwartenden Fehler konform zu den Ergebnissen einer vergleichbar durchgeführten FMEA. Die aus dem Erfahrungswissen der Werker bestimmten Fehlerhäufigkeiten entsprechen in sehr guter Näherung den Fehleraufzeichnungen, Abweichungen entstehen gegenüber den Aufzeichnungen nur bei ins Feld gelangenden Fehlern, dies entspricht der zu Grunde liegenden Logik. Die ermittelten Fehlerkosten in Euro/Jahr sind plausibel.

5.3 **Abgleich mit den geforderten Zielen**

Es sollte eine Methode zu entwickelt werden, die Qualität, Zeit und Kosten in Zusammenhang bringt und so eine gemeinsame Optimierung ermöglicht. Die Methode sollte mit geringem Aufwand zu einer signifikanten Erhöhung der Wertschöpfung einer Montagelinie führen indem die Konformitätskosten den Abweichungskosten so gegenüber gestellt werden, dass wirtschaftlich sinnvolle Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen gefunden werden können. Die Berechnung der Abweichungskosten durch Umsetzung der Prozess-Risiken in absolute Fehlerzahlen und Berücksichtigung der entsprechenden, zugehörigen Prozess-Störungen erlaubt die direkte Gegenüberstellung mit den Investitionen in Vermeidungs- und Prüfmaßnahmen. Das Erfahrungswissen der Werker ist für die schnelle Definition und Bewertung der Prozess-Risiken geeignet. Die Validierung der FPM gegen Produktionsdaten zeigte, dass die Nutzung des Erfahrungswissens der Werker von sehr großer Bedeutung ist und einen wertvollen Beitrag zur Optimierung des Montageprozesses liefert. Die beschriebene Methode erlaubt in der Planungsphase einer Montagelinie eine schnelle und doch ausreichend detaillierte Bewertung der potentiellen Risiken und kann die Kombination aus Risikofilter und FMEA für alle Arbeitsschritte, für die ausreichend Erfahrungen vorliegen, ohne Einschränkungen ersetzen.

Darüber hinaus sind durch die neue Methode Aussagen zur Effektivität des Prozesses, also wie viele Einheiten ohne jede Prozessstörung produziert werden können, möglich. Die Anwendung der Methode zeigte, dass nach kurzer Einführung die Werker gut mitarbeiten konnten.

6 Zusammenfassung

Die Planung von Montageprozessen hat in der üblichen Vorgehensweise Defizite hinsichtlich der Findung des wirtschaftlichen Optimums. Geschuldet ist das den eingesetzten Methoden, die nur ein Optimierungsziel (Zeit, Qualität, Kosten) verfolgen. Diese Arbeit beschreibt eine neue Methode zur synchronen Optimierung eines Prozesses. Ausgehend von einer Betrachtung der Planung eines Montageprozesses und dessen typischen Eigenschaften wurden repräsentative Vertreter der Optimierungsrichtungen analysiert. Für die Optimierungsrichtung Zeit war dies die MTM (methods-time measurement), die eine Planung der benötigten Zeiten zulässt, in dem die Arbeitsschritte bis auf zeitlich definierte Elemente zerlegt und die ermittelten Einzel-Zeiten anschließend aufsummiert werden. Diese etablierte Methode ermöglicht die optimale Austaktung einer Montagelinie, geht aber von idealen Bedingungen hinsichtlich der Werker aus, in dem keine Werkerfehler angenommen werden. Die MTM gleicht diesen Umstand durch größere Dimensionierung der Verteilzeiten aus, kann jedoch keine Aussagen zur Erhöhung der Kosten durch auftretende Fehler machen. Für die Optimierungsrichtung Qualität wurde die FMEA betrachtet, die durch die systematische Vorgehensweise des VDA sehr gut das potentielle Fehlgeschehen erfasst und dadurch die präventive Maßnahmenfindung unterstützt. Die FMEA kann ohne Modifikation des Standards aber keine Fehlerkosten ausweisen, dadurch ist eine wirtschaftliche Gegenüberstellung von Investitionen in Vermeidungsmaßnahmen oder Prüfungen nicht möglich. Für die Optimierungsrichtung Kosten wurde die Prozesskostenrechnung betrachtet, die zwar in der Lage ist, die entstehenden Kosten (Konformitätskosten, mit Erweiterungen auch Abweichungskosten) einzelnen Prozessschritten zuzuordnen, aber z.B. den Zusammenhang zwischen Veränderung der Abweichungskosten bei unterschiedlichen Zeitpunkten der Fehlerentdeckung im Prozess nicht abbilden kann.

Durch Analyse der Stärken und Schwächen der betrachteten Methoden konnten in einem weiteren Schritt die Elemente der neuen Methode definiert werden. Das Grundgerüst bildet eine Matrix, die von den Arbeitsschritten als einer Achse und von den potentiellen Fehlern als die andere Achse aufgespannt wird. Die Fehler werden als Kombination von Fehlerort und Fehlerart erfasst, die Arbeitsschritte als lineare Abfolge. Zum Füllen der Matrix wird auf das Erfahrungswissen der Werker zurückgegriffen, diese nennen die Wahrscheinlichkeit des Fehlerauftretens, die Orte der Fehlerentdeckung und die nötige Zeit zur Fehlerbehebung. Im Weiteren wurden die Modelle zur Berechnung der Fehlerkosten definiert und geeignete Auswertungsformen und Kennzahlen erarbeitet. Zur aktiven Unterstützung der Methodenanwendung wurde dann auf Basis eines Tabellenkalkulationsprogramms eine Programmsammlung erstellt, die alle vorher definierten Auswertungen und Kennzahlen aus den Analysedaten erstellen kann. Die Einschränkungen, die sich durch die File-Orientierte Tabellenkalkulation ergeben wie der Ausschluss von gleichzeitigem Bearbeiten der Daten oder die Schwierigkeit der Versionsverwaltung der Files, wurden durch die Erweiterung des Modells zu einer Datenbankanwendung mit Web-Zugriff überwunden.

Die neue Methode wurde in einem weiteren Schritt validiert. Als erstes wurden die Einschätzungen der Werker bezüglich der Fehlerwahrscheinlichkeiten mit realen Fehleraufzeichnungen verglichen. Die Resultate waren zufriedenstellend, die Einschätzungen der Werker stimmten gut mit den früher ermittelten, tatsächlich aufgetretenen Fehlerzahlen überein. Eine weitere Validierung der neuen Methode fand im direkten Vergleich mit einer Prozess-FMEA für den gleichen Teil-Prozess einer Montagelinie statt. Sowohl die FMEA als auch die neue Methode fanden alle potentiellen Fehler, die FMEA priorisierte jedoch die Fehler in einer anderen Reihenfolge: einige Fehler, die in der Montagelinie einen

hohen Nacharbeitsaufwand verursachen, wurden bei der FMEA nur schwach priorisiert.

7 Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen

7.1 Betrachtungen zur statistischen Zuverlässigkeit der Bewertungssystematik der Auftretenswahrscheinlichkeit

Das Erfahrungswissen der Werker ist von dem Kontext abhängig, in dem es erworben wurde. Ein Werker einer Montagelinie mit sehr hohen Stückzahlen wird bei der Bewertung einer geplanten Linie mit geringerem Ausstoß eine verringerte Vorhersagequalität gegenüber einem Werker mit besser passendem Kontext aufweisen. Durch Berücksichtigung von Untersuchungen zu menschlichen Fehlerraten (LaSala 2002) kann, bei zusätzlicher Berücksichtigung des Komplexitätsgrades der Arbeiten und der Auslastung der Werker, eine entsprechende Fehlerwahrscheinlichkeit prognostiziert werden. Diese errechnete Fehlerwahrscheinlichkeit kann zur Plausibilisierung der aufgenommenen Erfahrungswerte der Werker verwendet werden.

7.2 Erweiterung der FPM

Bei der Erprobung der neuen Methode ergaben sich zusätzliche Fragestellungen. Die wichtigste ist der Umgang mit häufig wechselnden, völlig unterschiedlichen Varianten auf der gleichen Montagelinie, wenn auch die Arbeitsinhalte stark unterschiedlich sind.

Ein Ansatz wäre die Berücksichtigung von Variantenanteilen bei der Analyse und Berechnung: im Hinblick auf steigende Variabilität der Produkte wäre eine Erweiterung des Modells der FPM zur Fehlerkostenberechnung sinnvoll, insbesondere um bei anfälligen Entscheidungen hinsichtlich neuer Varianten oder Art und Umfang von Gleichteile-Umfängen Unterstützung zu bieten.

In Abschnitt 4.2.15 wurde gezeigt, wie der Bewertungskatalog für das Auftreten von Fehlern an die Jahresproduktion angepasst werden kann.

Vorteilhaft wäre hier die variable Wahl der Bewertungskataloge für Kleinserien: Dazu müsste das FPM-Berechnungsmodell auf die direkte Anwendung von Fehlerwahrscheinlichkeiten umgestellt werden. Eine auf den Fehlerwahrscheinlichkeiten basierende Berechnung wäre auch bei starken Änderungen von Produktionszahlen sinnvoll.

Berücksichtigung der tatsächlichen Wertschöpfungen bzw.

Wertschöpfungsverluste, Mehraufwände bei Remontage, Berücksichtigung von Anlagenkosten: Die Aussagen zu Opportunitäts- und Abweichungskosten wären präziser, was die Optimierung bezüglich kleiner Fehlerzahlen erleichtert würde.

Klassifizierung von MTM-Elementen hinsichtlich

Fehlerwahrscheinlichkeiten: Dadurch wäre eine Vorabschätzung von zu erwartenden Fehler schon während der ersten Planungsphase möglich und die während der FPM erfassten Fehler könnten direkt plausibilisiert werden.

Ableiten von notwendigen Werker-Fertigkeiten aus der FPM: Dadurch wäre es möglich, schon während der Planungsphase einer Montagelinie Qualifizierungsmaßnahmen für Werker zu definieren.

7.3 Simulation

Die in der FPM-Analyse gewonnenen Daten bezüglich der Wahrscheinlichkeiten von Fehlerauftritt und Fehlerentdeckung an den einzelnen Stationen des Montageprozesses können verwendet werden, um ein Simulationsmodell an die zu erwartende Fertigungsrealität anzunähern – insbesondere im Hinblick auf eventuelle Engpässe bei der Nacharbeit oder Minderung der Ausbringung. Dies wurde für das Simulationssystem „Plant Simulation“ von Siemens gezeigt, indem ein „QM-Modul“ programmiert wurde, das die Fehler und Fehlerentdeckungen für jede Station im Simulationsmodell einer Montagelinie berücksichtigt und somit sehr viel präziser die Auslegung z.B. von Nacharbeitsbereichen überprüfen kann. Darüber hinaus kann durch die Simulation sehr viel genauer die

Auswirkung der Prozessstörungen auf die Ausbringung der Linie ermittelt werden.

7.4 Übertragung des FPM-Prinzips auf weitere Anwendungsfelder

Das Grundprinzip der FPM kann auf andere Bereiche übertragen werden. Zum Beispiel ist vorstellbar, dass administrative Prozesse in ähnlicher Weise analysiert und optimiert werden könnten.

8 Literaturverzeichnis

- Alber et al. 1999** Alber, T. & Westkämper, E. 1999.
Optimierung manueller Montageprozesse -
Verkürzung sekundärer Montagezeiten.
WT. Werkstattstechnik **89** (9), S.426–428.
- Albrecht 2005** Albrecht, Wolfram 2005
*Innovative Validierung und Optimierung der
Prüfkette einer Motorenfertigung*, Diplomarbeit,
Reutlingen.
- Bader 2012** Bader, Florian 2012
*Konzept zur Erweiterung der Fehler-Prozess-
Matrix zu einem zentralen Werkzeug zur Prozess-
und Lieferantenbewertung*, Diplomarbeit,
Stuttgart.
- Becker et al. 2006** Becker, G., Hanisch, T., Oehmgen, T., Rattke, J. &
Schubert, B. 2006.
Konzept für die Bewertung menschlicher
Fehlhandlungen in technischen Systemen.
In: *Probabilistische Sicherheitsanalysen in der
Kerntechnik*,
23.-24.11.2006, München, S. 16.1-16.7.
- Becks 1998** Becks, Carl 1998.
MTM - Werkzeug zur Gestaltung und
Quantifizierung von Montageprozessen,
In: J. Milberg and G. Reinhart (Hrsg.): *Moderne
Methoden zur Montageplanung*.
München, Utz.
ISBN 9783931327361.
- Berndt 1998** Berndt, Ralph 1998
Springers Handbuch der Betriebswirtschaftslehre,
Berlin, Springer.
ISBN 9783540648291.
- Bertsche et al. 2004** Bertsche, Bernd & Lechner, Gisbert 2004
*Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau:
Ermittlung von Bauteil- und System-
Zuverlässigkeiten*, 3. Aufl.,
Berlin [u.a.], Springer.
ISBN 9783540208716.
- Bruhn 1997** Bruhn, M. 1997
Wirtschaftlichkeit des Qualitätsmanagements,
Berlin, Heidelberg, Springer.
ISBN 9783540630333.

- Bühner 2004** Bühner, Rolf 2004
Betriebswirtschaftliche Organisationslehre, 10. Aufl., München [u.a.], Oldenbourg. ISBN 9783486275001.
- Bullinger et al. 1986** Bullinger, H. J. & Ammer, Dieter 1986
Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis, München, Hanser. ISBN 3446146067.
- Butz 2010** Butz, Hans-Jürgen 2010
Effizienz und Qualität: Systematisch zum Erfolg, 1. Aufl., Düsseldorf, Symposion. ISBN 3939707643.
- DIN 8593** DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2003
Fertigungsverfahren Fügen, Berlin, Beuth.
- DIN EN 1305-1** DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 11.1996
Value Management Wertanalyse Funktionenanalyse, Berlin, Beuth.
- DIN EN ISO 9000:2005-12** DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 12.2005
Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, Berlin, Beuth.
- Duden** Bibliographisches Institut GmbH 2013
DUDEN online, Berlin, zuletzt geprüft am 12. August 2013. Verfügbar: from www.duden.de.
- Eversheim 1997** Eversheim, Walter 1997
Prozessorientiertes Qualitätscontrolling: Qualität messbar machen, Berlin, Springer. ISBN 3540630627.
- Eversheim 2002** Eversheim, Walter 2002
Arbeitsvorbereitung, 4. Aufl., Berlin, Springer.
- Feldmann et al. 2003** Feldmann, K. et al. 2003
Montage Strategisch Ausrichten: Praxisbeispiele Marktorientierter Prozesse und Strukturen, Berlin, Springer. ISBN 9783540403043.

- Galton 1907** Galton, Francis 1907.
Vox Populi.
Nature **75** (1949), S.450–451.
- Gamweger et al. 2008** Gamweger, Jürgen et al. 2008
Design for Six Sigma: Grundlagen, Methoden, Praxis, 1. Aufl.,
München, Hanser.
ISBN 978-3-446-41454-9.
- Goebbels et al. 2004** Goebbels, Steffen & Jakob, Rüdiger 2004
Geschäftsprozess-FMEA: Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse für IT-gestützte Geschäftsprozesse, 1. Aufl.,
Düsseldorf, Symposion.
ISBN 9783936608670.
- Graf 1998** Graf, Gerald 1998
Nutzenorientierte Qualitätskostenrechnung: Ansätze zur Erfassung und marktorientierten Schätzung von Qualitätskosten auf Basis der Prozesskostenrechnung,
Frankfurt am Main, New York, P. Lang.
ISBN 9783631331194.
- Haffner 2005** Haffner, Andreas 2005
Ein Modell zur Bestimmung der monetären Einsparungspotenziale bei der Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA),
Heimsheim, Jost-Jetter Verlag.
ISBN 3936947678.
- Hagmayer 2006** Hagmayer, Achim 2006
Kongruenzuntersuchung FMEA - FPM,
Diplomarbeit,
Stuttgart.
- Härtl 2008** Härtl, Holden 2008
Implizite Informationen: Sprachliche Ökonomie und interpretative Komplexität bei Verben,
Berlin, Akademie Verlag.
ISBN 3050045027.
- Hehenberger 2011** Hehenberger, Peter 2011
Computerunterstützte Fertigung: Eine kompakte Einführung, 1. Aufl.,
Berlin[u.a], Springer.
ISBN 3642134750.
- Heinlein 2006** Heinlein, Stefanie 2006
Qualitätskostenbetrachtung in der Fehler-Prozess-Matrix (FPM), Diplomarbeit,
Stuttgart.

- Henke 2012** Henke, Jürgen 2012
Fehler-Prozess-Matrix - Das FPM-Tool,
Stuttgart,
zuletzt geprüft am 13. August 2012.
Verfügbar: from
<http://fpm.fraunhofer.de/fpm/pages/das-fpm-tool.php>.
- Hering et al. 2003** Hering, Ekbert & Braun, Johannes 2003
Qualitätsmanagement für Ingenieure: Mit 116 Tabellen, 5. Aufl.,
Berlin [u.a.], Springer.
ISBN 9783540434276.
- Hummel 2011** Hummel, Oliver 2011
Aufwandsschätzungen in der Software- und Systementwicklung kompakt, 1. Aufl.,
Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.
ISBN 3827427517.
- Jung 2007** Jung, H. 2007
Controlling,
München [u.a.], Oldenbourg.
ISBN 9783486585001.
- Juran et al. 1999** Juran, Joseph M. & Godfrey, A. Blanton 1999
Juran's quality handbook, 5. Aufl.,
New York, McGraw Hill.
ISBN 007034003x.
- Kamiske et al. 2007** Kamiske, G.F & Brauer, J.P 2007
Qualitätsmanagement von A bis Z: Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements,
München, Hanser.
ISBN 9783446412736.
- KBA 2010** Kraftfahrt-Bundesamt 2010
Jahresbericht,
zuletzt geprüft am 2. April 2014.
Verfügbar: from www.kba.de.
- Kern et al. 2011** Kern, C. & Refflinghaus, R. 2011.
Analysis of human reliability in manual assembly operations.
In: *Innovation in Product and Production*,
31.7.-4.8.2011, Stuttgart, S. 1–6.
- Klose-Hegewald 2009** Klose-Hegewald, Ina 26.10.2009
Bundestagung 2009 in Stuttgart gibt branchenübergreifende Impulse für die Zukunft: Gewerkschaft: Mit MTM-Normleistung win-win-Situation kreieren,
Hamburg.

- Konold et al. 2009** Konold, Peter & Reger, Herbert 2009
Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung, 2. Aufl., Wiesbaden, Vieweg.
ISBN 9783528138431.
- LaSala 2002** LaSala, Kenneth P. 2002
A practical guide to developing reliable human-machine systems and processes, Rome, NY, Reliability Analysis Center.
ISBN 9780971285385.
- Lay et al. 2000** Lay, Gunter & Schirrmeister, Elna 2000
Sackgasse Hochautomatisierung?: Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion, Karlsruhe, ISI.
- Le 2012** Le, Dung 2012
Bewertung der Eignung der Fehler-Prozess-Matrix für die Endmontage von Motorgeräten bei STIHL, Diplomarbeit, Stuttgart.
- Lesmeister 2001** Lesmeister, Frank 2001
Verbesserte Produktplanung durch den problemorientierten Einsatz präventiver Qualitätsmanagementmethoden, Düsseldorf, VDI-Verlag.
ISBN 3183132168.
- Lotter 1986** Lotter, Bruno 1986
Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik, Düsseldorf, VDI-Verlag.
ISBN 318400709x.
- Lotter et al. 1994** Lotter, Bruno & Schilling, Werner 1994
Manuelle Montage: Planung - Rationalisierung - Wirtschaftlichkeit, Düsseldorf, VDI-Verlag.
ISBN 3540621598.
- Lotter et al. 2006** Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter 2006
Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis, Berlin [u.a.], Springer.
ISBN 9783540366690.
- Loy 2010** Loy, Michael 2010
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung, München, Utz.
ISBN 3831640270.

- Masing et al. 2007** Masing, Walter & Pfeifer, Tilo 2007
Handbuch Qualitätsmanagement, 5. Aufl.,
München, Hanser.
ISBN 3446407529.
- Mumm 2008** Mumm, Mirja 2008
*Kosten- und Leistungsrechnung: Internes
Rechnungswesen für Industrie- und
Handelsbetriebe*,
Heidelberg, Physica-Verlag Heidelberg.
ISBN 3790819603.
- Nada et al. 2006** Nada, O.A, ElMaraghy, W.H & ElMaraghy, H.A
2006.
Quality Prediction due to Human Performance
Variation in Manufacturing and Assembly.
In: *First CIRP International Seminar on Assembly
Systems*,
15.-17.11.2006, Stuttgart, S. 123–128.
- Olshagen 1995** Olshagen, Christoph 1995
Prozesskostenrechnung: Aufbau und Einsatz,
Wiesbaden, Gabler.
ISBN 340912120X.
- Oppitz et al. 2004** Oppitz, Volker & Nollau, Volker 2004
*Taschenbuch der Wirtschaftlichkeitsrechnung:
Quantitative Methoden der ökonomischen
Analyse*,
Leipzig, Fachbuchverlag.
ISBN 9783446224636.
- Pfeifer 1996** Pfeifer, Tilo 1996
*Praxishandbuch Qualitätsmanagement: Mit 42
Tabellen*,
München [u.a.], Hanser.
ISBN 9783446181564.
- Pfeifer 2002** Pfeifer, T. 2002
*Qualität in produzierenden Unternehmen 2002 –
Eine Untersuchung zum Zusammenhang
zwischen Unternehmenserfolg und
Qualitätsmanagement*,
Aachen, Fraunhofer IPT Abteilung Mess- und
Qualitätstechnik.
- Pfeifer et al. 2002** Pfeifer, Tilo & Heiliger, S. 2002.
Qualitätsorientierte Produktgestaltung mit Rapid
Quality Deployment,
In: R. Woll (Hrsg.): *Qualitätswissenschaft für
Bildung und Praxis*.
Aachen, Shaker.
ISBN 3826598407.

- Ponn et al. 2008** Ponn, Josef & Lindemann, Udo 2008
Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten,
Berlin, Heidelberg, Springer.
ISBN 3540685626.
- Preißler 2007** Preißler, Peter R. 2007
Controlling: Lehrbuch und Intensivkurs, 13. Aufl.,
München [u.a.], Oldenbourg.
ISBN 3486584995.
- Remer 1997** Remer, Detlef 1997
Einführen der Prozesskostenrechnung: Grundlagen Methodik Einführung und Anwendung der verursachungsgerechten Gemeinkostenzurechnung,
Stuttgart, Schäffer-Poeschel.
ISBN 3-7910-1113-8.
- Salvendy 2001** Salvendy, G. 2001
Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management,
Chichester, Wiley.
ISBN 9780471330578.
- Schlick 2010** Schlick, Christopher 2010
Arbeitswissenschaft, 3. Aufl.,
Berlin, Heidelberg, Springer.
ISBN 3540783334.
- Schloske 2009** Schloske, Alexander Bertrand 2009.
Risikomanagement mit FMEA,
In: G. Kamiske (Hrsg.): *Qualitätstechniken für Ingenieure*.
Düsseldorf, Symposium, S. 285–327.
ISBN 9783939707622.
- Schloske 2010** Schloske, A.B. 2010
DGQ-FMEA Schulung, Stuttgart, 1.11.2010.
- Schmeisser 2010** Schmeisser, Wilhelm 2010
Technologiemanagement und Innovationserfolgsrechnung,
München, Oldenbourg.
ISBN 3486598309.
- Schmidt 1996** Schmidt, Susann 1996
Entwicklung eines Kostenrechnungsmodells für die Qualitätssicherung,
Aachen, Shaker.
ISBN 9783826553998.

- Schmidt 2008** Schmidt, Andreas 2008
Kostenrechnung: Grundlagen der Vollkosten-, Deckungsbeitrags- und Plankostenrechnung sowie des Kostenmanagements, 5. Aufl., Stuttgart, Kohlhammer.
ISBN 9783170204171.
- Schneider 2010** Schneider, Nicolas 2010
Vergleichende Analyse und Bewertung von realen Fehleraufzeichnungen aus einer Motorenproduktion mit den prognostizierten Fehlern aus einer Analyse mit der Fehler-Prozess-Matrix, Studienarbeit, Stuttgart,
zuletzt geprüft am 18. März 2012.
- Schuh et al. 2008** Schuh, G., Gottschalk, S., Gulden, A., Hilchner, R., Pyschny, R., Buchner, T. & Haubrich, T. 2008.
Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation.
wt Werkstatttechnik online **98** (9), S.670–674.
- Schuh G. et al. 2005** Schuh G., Kampker, A. & Franzkoch, B. 2005.
Anlaufmanagement.
wt Werkstatttechnik online **95** (5), S.405–409.
- Seidenschwarz 2004** Seidenschwarz, Werner 2004
Target Costing: Marktorientiertes Zielkostenmanagement, 2. Aufl., München, Vahlen.
ISBN 9783800621309.
- Spath et al. 2001** Spath, Dieter & Wolski, Anna 2001
Quo vadis, PPS?: Erfolgsfaktoren von Auftragssteuerungssystemen in dezentralen Strukturen im turbulenten Umfeld, Stuttgart, LOG_X Verl.
ISBN 3-932298-13-6.
- Spath et al. 2007** Spath, D., Scholtz, O., Rally, P. & Bender, M. 2007.
Montagesystem-Check. Produkt und Montageaufgabe bestimmen die Auswahl des Montagesystems.
wt Werkstatttechnik online **97** (9), S.625–632.
- Spengler et al. 2005** Spengler, Thomas, Volling, Thomas & Rehkopf, Stefan 2005.
Zum Einsatz von Chaku-Chaku-Systemen in der Montage konsumentennaher Erzeugnisse - eine Fallstudie bei Rahmenauftragsfertigung,
In: H.-O. Günther, D.C. Mattfeld, & L. Suhl (Hrsg.):
Supply Chain Management und Logistik.
Heidelberg, Physica-Verlag, S. 249–275.
ISBN 978-3-7908-1625-9.

- Steinhardt 2006** Steinhardt, Thorsten 2006.
Overall Equipment Efficiency (OEE).
Controller-Magazin (Mai-Juni).
- Steyr 2004** BMW 2004
FEDOK: Fehlerdokumentation Montagelinien,
Steyr.
- Theden 2002** Theden, Philipp 2002
*Qualitätstechniken: Werkzeuge zur
Problemlösung und ständigen Verbesserung*, 3.
Aufl.,
München, Wien, Hanser.
ISBN 3-446-21864-5.
- Tietjen et al. 2003** Tietjen, Thorsten & Müller, Dieter H. 2003
*FMEA-Praxis: Das Komplettpaket für Training
und Anwendung*, 2. Aufl.,
München, Hanser.
ISBN 9783446223226.
- VDA 2008** VDA 2008
Jahresbericht 2008,
Berlin,
zuletzt geprüft am 15. April 2012.
Verfügbar: from
<http://www.vda.de/de/downloads/489/>.
- VDA-QMC** VDA-QMC 2008
Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz,
Oberursel, VDA QMC.
- VDI 2011** VDI 2011
*Wertanalyse - das Tool im Value Management:
Idee, Methode, System*, 6. Aufl.,
Berlin, Springer.
ISBN 3540795170.
- VDI 2860** VDI 01.05.1990
*Montage- und Handhabungstechnik:
Handhabungsfunktionen,
Handhabungseinrichtungen ; Begriffe,
Definitionen, Symbole*, 2860,
Düsseldorf, VDI.
- Wannenwetsch 2005** Wannenwetsch, H. 2005
*Vernetztes Supply Chain Management: SCM-
Integration über die gesamte
Wertschöpfungskette*,
Berlin [u. a.], Springer.
ISBN 9783540234432.

- Warnecke et al. 1975** Warnecke, Hans-Jürgen *et al.* 1975
Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung,
Mainz, Krausskopf.
ISBN 378300098X.
- Werdich et al. 2011** Werdich, Martin *et al.* 2011
FMEA - Einführung und Moderation,
Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag.
- Westkämper 2001** Westkämper, Engelbert 2001.
Modulare Produkte - modulare Montage.
wt Werkstatttechnik online **91** (8), S.479–482.
- Westkämper 2001b** Westkämper, E. *et al.* 2001
Montageplanung - effizient und marktgerecht.,
Berlin, Springer.
ISBN 3540666478.
- Wiendahl 2008** Wiendahl, Hans-Peter 2008
Betriebsorganisation für Ingenieure: 2 Tabellen,
6. Aufl.,
München, Wien, Hanser.
ISBN 978-3-446-41279-8.
- Wittig 1994** Wittig, Klaus-Jürgen 1994
Qualitätsmanagement in der Praxis: DIN ISO 9000, Lean Production, Total Quality Management : Einführung eines QM-Systems im Unternehmen, 2. Aufl.,
Stuttgart, Teubner.
ISBN 9783519163404.

A Anhang

A.1 Aufbau der FPM-Datenbank

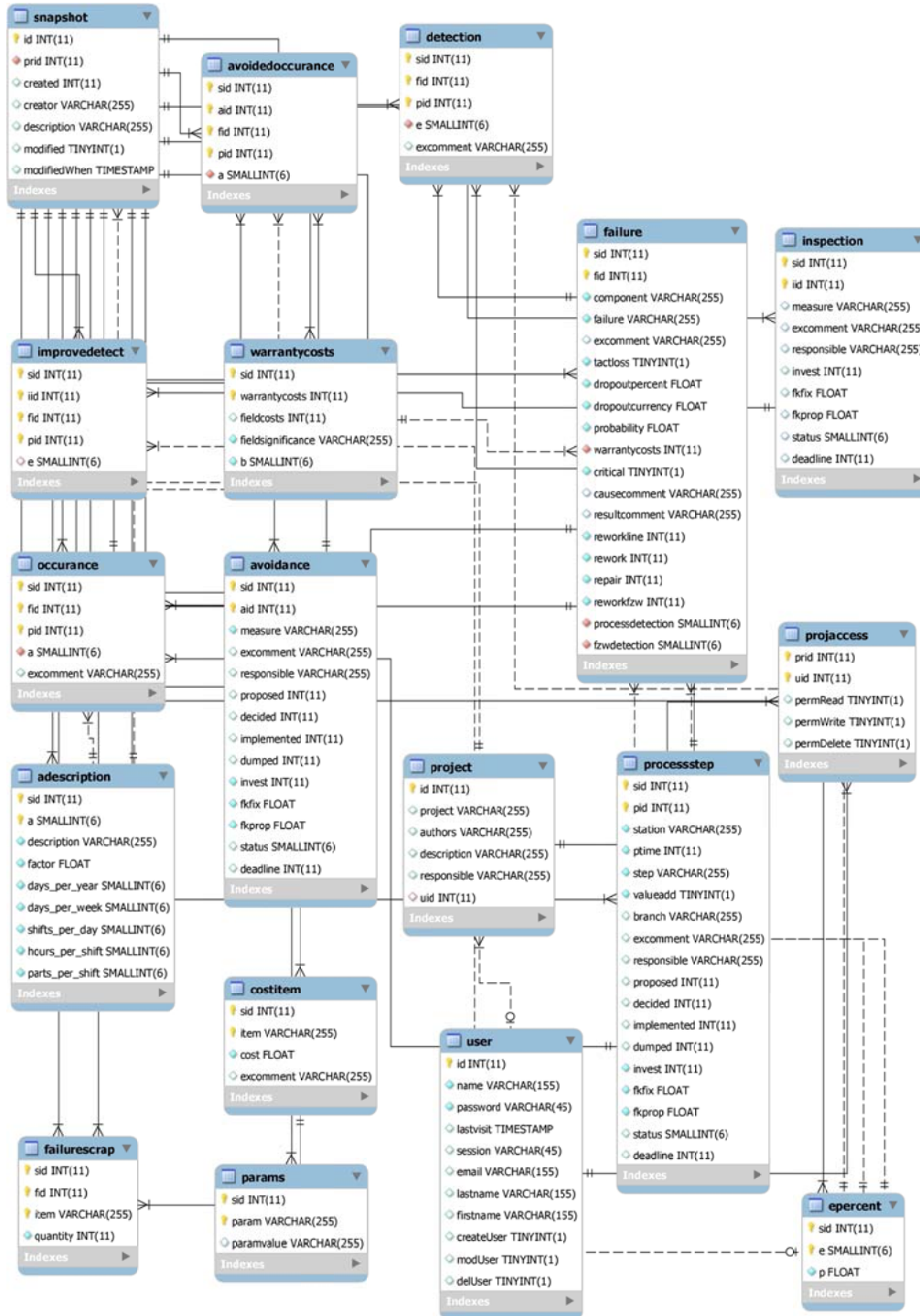


Abbildung 64 Realisierung des Datenmodells

A.2 Checkliste FPM

<u>Checkliste: Vorbereitung Fehler-Prozess-Matrix</u>	
Teamzusammensetzung:	
▪ Werker mit Erfahrung in Serienmontage (z.B. Springer)	<input type="radio"/>
▪ Moderator	<input type="radio"/>
▪ Qualitätsverantwortlicher	<input type="radio"/>
▪ Prozessplaner	<input type="radio"/>
▪ Fertigungsplaner bzw. Strukturbetreuer	<input type="radio"/>
Vorbereitung:	
▪ Prüfdaten (Endprüfung, Kamera, Produktaudit, ppm, usw.) vergleichbarer Montagelinien zur Plausibilisierung besorgen	<input type="radio"/>
▪ Idealerweise werden die Prüfdaten den jeweiligen Montageschritten zugeordnet.	<input type="radio"/>
▪ Falls vorhanden: Garantiefälle, die der Montage zugeordnet werden können	<input type="radio"/>
▪ Prozessschritte im Vorfeld erfassen	<input type="radio"/>
▪ Handhabungsprozesse entfernen	<input type="radio"/>
▪ Vormontageprozesse in den Montagefluss eingliedern	<input type="radio"/>
▪ Prozessschritte den jeweiligen Arbeitsplätzen zuordnen	<input type="radio"/>
▪ Automatikstationen als Prüfschritt kennzeichnen	<input type="radio"/>
▪ Zu betrachtendes Produkt im zerlegten Zustand besorgen	<input type="radio"/>
▪ Kostenauflösung für zu betrachtendes Produkt beim Controlling besorgen	<input type="radio"/>

Abbildung 65 Checkliste (Le 2012)

A.3 Weitere FPM-Werkzeuge

Ein auf Basis einer Rapid-Prototyping-Sprache realisiertes Werkzeug ist in Abbildung 66 und Abbildung 67 gezeigt. Im Erfassungsfenster dieses Werkzeugs können – um die Übersichtlichkeit zu bewahren – alle Informationen zu einem Prozessschritt (Fehler, Entdeckungen, etc.) bei Bedarf auf- oder wieder eingefaltet werden. Am unteren Fensterrand können die Werte für Nacharbeitsaufwände, Ausschussteile etc. eingepflegt werden. Diese Anwendung greift auf die gleichen Datenbanken zu, wie die in Kapitel 4 beschriebenen Werkzeuge.

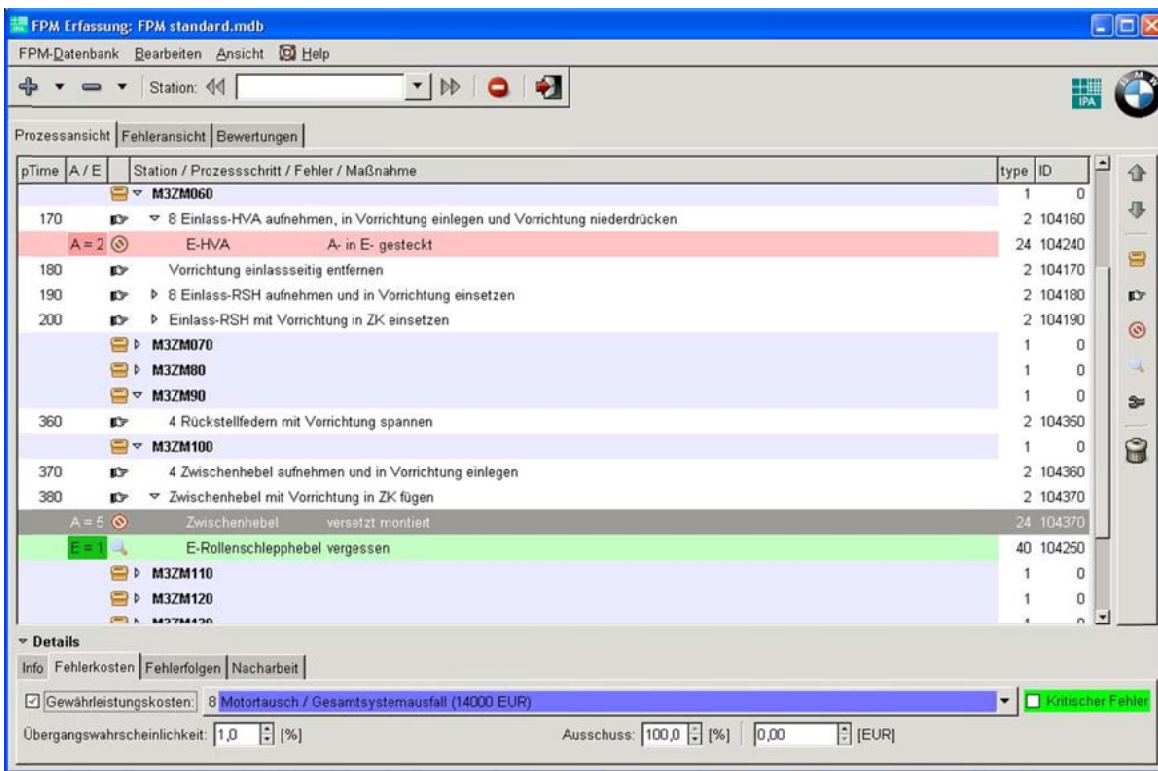


Abbildung 66 Erfassungsfenster der readExcel V3

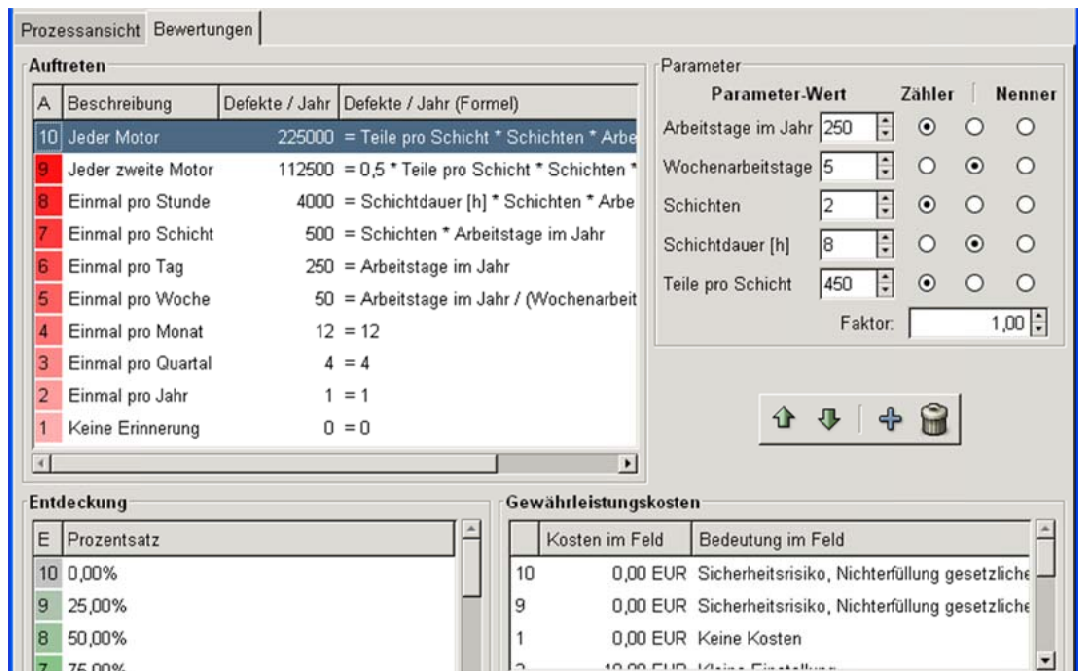


Abbildung 67 Bewertungskatalog bei readExcel V3



Abbildung 68 Pflege der FPM-Daten mittels PDA

A.4 Integration der Methodik in ein CAQ-System

Die Integration in ein CAQ-System (CAQ=QSYS der IBS AG) zeigt Vorteile bei der direkten Verknüpfung der Prüfschritte der neuen Methodik mit den Prüfplänen des CAQ-Systems – hier ist sichergestellt, dass jederzeit ein aktueller Stand bewertet wird. Der Preis dafür ist der Wegfall der ad-hoc-Fehlereingabe, der die FPM-Analyse mit einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm so einfach und schnell macht.

Zu prüfen ist weiterhin die Verwendung von Fehlerdefinitionen früherer FPM-Analysen auf dabei auftretende Fehler.

Produkte Nacharbeit (Plan)	Eindeckel Fehler (Plan)	Anzahl Durchschuß(Plan)	Beurteilung	Auftrags*	Eindeckelung	Komponente*	Fehler*	Eingang	Montage	Endmontage	Fahrzeugwerk	
219,42	243,8	6,2	7	6	4	Zündkerze	Beschädigung		6		4	
47,02	49,5	0,5	5	5	3	Ventilfeder	Verwechslung beim Hersteller			5		3
47,4	49,3	0,1	7	5	4	Muttern Lagerdeckel	nicht passgenau			5	6	4
33,75	37,5	12,5	3	5	7	Ölpumpe	Montagefehler	5		7		
235,12	247,5	2,5	5	6	3	Zentralachse	vertauscht mit Bauteil eines anderen Motors			6		3
219,42	243,8	6,2	5	6	4	Kettenspanner	zu spät entriegelt		6	4		
445,5	495	5	8	7	3	Dichtung Abgaskammer	vergessen	7			3	
								6				6

Abbildung 69 FPM-Modul im CAQ-System (IBS 2012)

Die heutige Montageplanung steht vor der Aufgabe, dass wegen der größer werdenden Komplexität der Produkte die Anforderungen an die Planung wachsen, d.h. die Aufgabe, eine optimale Montage zu planen, wird besonders bezüglich der Qualitätsziele (»Zero Defects«) anspruchsvoller. Gleichzeitig muss die Planung knappere Zeit- und Kostenvorgaben einhalten. Die etablierten Methoden liefern dazu nur einen Teil-Beitrag – so ist die Prozess-FMEA zwar geeignet, qualitative Aussagen zu potentiellen Fehlern zu machen, die Identifikation von möglichen Fehlerkosten ist nicht oder nur schwer möglich.

In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur Bewertung möglicher Fehler in der manuellen Montage vorgestellt. Diese Methode nutzt das vorhandene Wissen der Werker, um Fehler als absolute Zahlen zu erfassen und in Kombination mit den erforderlichen Nacharbeiten und anfallenden Ausschussteilen die Fehlerkosten zu ermitteln. Basierend auf diesen Fehlerkosten können Maßnahmen zur Prozessverbesserung priorisiert und wirtschaftlich sinnvoll festgelegt werden.

ISBN 978-3-8396-0964-4



FRAUNHOFER VERLAG