

**wbk Institut für Produktionstechnik
der Universität Karlsruhe (TH)**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Marc Wawerla

Abschlussbericht [ViLMA](#)

Verfügbarkeit im Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen

01. April 2005 bis 31. März 2007

gefördert durch die Stiftung Industrieforschung

Forschungsvorhaben Nr. S 689 (Projektantrag Nr. A10-01-05)

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	PROJEKTMANAGEMENT UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	2
3	GRUNDLAGEN	4
3.1	Definitionen	4
3.2	Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Ausfallverhaltens	6
4	ERGEBNIS DER PROJEKTARBEITSPAKETE	9
4.1	Praxisstudie zu aktuellen LCC Verträgen (AP1)	9
4.1.1	DaimlerChrysler	9
4.1.2	Department of Defense - Directive Number 5000.1 [Dod-03]	14
4.1.3	Deutsche Bahn (Konzeptidee)	16
4.1.4	Fiat Powertrain	20
4.1.5	Ford Motor Company	23
4.1.6	MAN (Konzeptidee)	29
4.1.7	Zusammenfassung	32
4.2	Strukturierung der Lebenszykluskosten (AP2)	32
4.2.1	Theoretische Identifikation der LCC Elemente	33
4.2.2	Auswahl und Strukturierung der LCC Elemente	40
4.3	Entwurf des Softwaretools (AP3)	53
4.4	Datenaufnahme, Berechnung und Prognose der LCC (AP4)	58
4.4.1	Maschinenzuverlässigkeitsuntersuchung	59
4.4.2	Methodik zur Bestimmung der LCC-Elemente	70

4.5	Risikobewertung und -prognose (AP5)	79
4.5.1	Relevanz der Risiken aus LCC-Verträgen	79
4.5.2	Risiken von LCC-Verträgen	79
4.5.3	Anforderungen an ein Risikomanagementsystem	80
4.5.4	Modell zur Risikobewertung	82
4.5.5	Daten- und Funktionsmodell	83
4.6	Erstellung des Softwareprototypen (AP6)	84
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	85
6	ANHANG	87
6.1	Abkürzungen	87
6.2	Veröffentlichungen	88
6.3	Unveröffentlichte Studien- und Diplomarbeiten	89
6.4	Weiterführende Literatur	90

1 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht des Projekts ViLMA (Verfügbarkeit im Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen) gibt einen detaillierten Überblick über die innerhalb des Projekts entstandenen Arbeiten. Der Bearbeitungszeitraum war 01. April 2005 bis 31. März 2007. Neben dem Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) waren folgende vier Unternehmen intensiv an der Erarbeitung und Umsetzung der Forschungsergebnisse beteiligt:

(1) EX-CELL-O GmbH

Salacher Straße 93
73054 Eislingen/Fils

(2) GEHRING GmbH & Co. KG

Gehringstraße
73760 Ostfildern

(3) INFOMAN AG

Vaihinger Straße 169
70567 Stuttgart

(4) KARL KLINK GmbH

Kelterstraße 94
75179 Pforzheim

Die Käufer von Produktionsanlagen und insbesondere von Werkzeugmaschinen berücksichtigen zunehmend auch die Lebenszykluskosten bei ihrer Investitionsentscheidung. Hierfür wird derzeit eine Vielzahl neuer unternehmensindividueller Konzepte entwickelt. Dies eröffnet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für die Maschinenbauindustrie, kreierte aber auch gleichzeitig neue Risiken. Die Intransparenz der Konzepte, der zusätzliche Aufwand in der Angebotserstellung, die erhöhten After-Sales-Kosten und die unübersehbaren Auswirkungen dieser neuen Ansätze bilden die Hauptprobleme. Um dem zu begegnen wurde mit der Antragstellung des vorliegenden Projekts das Ziel mit der **Bereitstellung wissenschaftlicher Methoden zur Ermittlung der Lebenszykluskosten** definiert. Als Teilziele wurden folgenden Punkte abgeleitet:

- Untersuchung des Stands der Praxis von Life-Cycle-Costing und Ableitung von Trends durch Unternehmensbefragungen und Interviews.
- Methodik zur Ermittlung der Lebenszykluskosten und Durchführung bei den Partnerunternehmen.
- Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der bestehenden Risiken von Life-Cycle-Costing für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.
- Entwicklung eines Softwareprototyps zur Demonstration der Funktionsweise der entwickelten Algorithmen.

2 Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt ist gemäß Abbildung 2-1 in sieben Arbeitspakete innerhalb von 24 Monaten Projektlaufzeit strukturiert. Der gesamte Ablauf des Projekts erfolgte im vorgegebenen Zeitrahmen.

Stand: 30.03.2005		2005			2006				2007
		Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
AP 1	Praxisstudie zu aktuellen LCC-Verträgen								
AP 2	Strukturierung der Lebenszykluskosten in einem Datenmodell								
AP 3	Entwurf des Softwaretools								
AP 4	Datenaufnahme, Berechnung und Prognose der LCC								
AP 5	Risikobewertung und -prognose								
AP 6	Erstellung des Softwareprototypen								
AP 7	Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit								

Abb. 2-1: Projektplan ViLMA

Den Fortschritt der Projektarbeiten kontrollierte ein Steering Committee bestehend aus jeweils einem Unternehmensvertreter und einem Institutsleitungsmitglied in insgesamt fünf Konsortialtreffen:

- 06. April 2005 am Institut für Produktionstechnik (wbk) in Karlsruhe
- 27. Oktober 2005 bei der infoman AG in Stuttgart
- 07. April 2006 bei der GEHRING GmbH & Co. KG in Ostfildern
- 28. November 2006 bei der KARL KLINK GmbH in Niefern-Öschelbronn
- 12. April 2007 bei der EX-CELL-O GmbH in Eisingen an der Fils

Über die Projektgrenzen hinaus wurde der fachliche Austausch sowohl mit Industrie, als auch mit wissenschaftlichen Institutionen etabliert. In diesem Rahmen fanden Gespräche mit folgenden Partnern statt:

- Fachlicher Austausch mit der **Industrie**: ALBERT WEBER GmbH, BOMBARDIER TRANSPORTATION, DAIMLERCHRYSLER AG, FREUDENBERG, HELLER, KRONES, MAN AG, MTU AERO ENGINES, MTU-Friedrichshafen GmbH, NOTHELPER, TESA, TRUMPF, HÄCKER, WITTENSTEIN, ZF-Friedrichshafen.
- Fachlicher Austausch in der **Wissenschaft**:
 - Arbeitskreis der Life-Cycle-Costing Projekte gefördert durch die Stiftung Industrieforschung: IWF der Universität Braunschweig, PTW Universität Darmstadt, PL der Universität Braunschweig.
 - Fachgespräch mit Prof. Uhrig-Homburg der Universität Karlsruhe (TH).

- Fachgespräch mit Prof. Bertsche des IMA der Universität Stuttgart (TH).
- Fachgespräche und internes Weiterbildungsseminar mit Prof. Prahabkar Murthy von der University of Queensland, St. Lucia, Australia.

Neben der Vielzahl an Kontakten in Industrie und Wissenschaft wurde gemäß Forschungsantrag eine Vielzahl an weiteren Veröffentlichungs- und Standardisierungsmaßnahmen ergriffen:

- 13 Fachveröffentlichungen, die aus den Arbeiten des Projekt entstammen (vgl. Anhang)
- Durchführung der Konferenz Herbsttagung am 27. September 2007 mit dem Titel Life-Cycle-Performance – Aktuelle Entwicklungen.
- Mitwirkung am Arbeitskreis Life-Cycle-Costing des VDMA zur Erarbeitung des VDMA Einheitsblatts 34160.
- Berücksichtigung in der studentischen Ausbildung durch die Integration von 12 Diplom-, einer Studien- und drei Seminararbeiten (vgl. Anhang).
- Dauerhafte Etablierung des Themas in die Lehre der Universität Karlsruhe mit zwei Einheiten der Vorlesung Integrierte Produktionsplanung:
 - Ausführungsplanung, Genehmigungen und life-cycle gerechte Beschaffung
 - Instandhaltung
- Veröffentlichung auf der Projektinternetseite als Kontaktforum:
<http://www.vilma.projekt.de>

3 Grundlagen

3.1 Definitionen

Ausfallrate (nach DIN EN 61703)

Die Ausfallrate λ beschreibt die Anzahl der Ausfälle pro Zeiteinheit [DIN-02]. Wenn man wie im Fall einer Exponentialverteilung von einer konstanten Ausfallrate ausgeht, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\lambda(t) = \lambda = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle}}{\text{Produktionszeit}} = \text{konst.} \quad (3-1)$$

MTBF, MTTR und MCRP

Neben der Ausfallrate kann das Maschinenausfallverhalten mit dem MTBF-Wert beschrieben werden. Der MTBF-Wert gibt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Störungsereignissen an ([VDI-05], S.33). Errechnen lässt er sich aus dem Quotienten der Produktionszeit und der Anzahl der Maschinenausfälle. Die Definitionen werden in Anlehnung an die Norm DIN EN 61703 [DIN-02] verwendet. Diese Beziehungen werden bei allen Berechnungen verwendet, die eine Exponentialverteilung zugrunde legen.

$$MTBF = \frac{\text{Produktionszeit}}{\text{Anzahl der Ausfälle}} = \frac{T_N + T_T}{N} = \frac{1}{\lambda(t)} \quad (3-2)$$

Dabei wird von einer konstant bleibenden Ausfallrate ausgegangen, so dass man den MTBF-Wert als reziproken Wert der Ausfallrate bestimmen kann, mit $MTBF = 1/\lambda$. Ein weiterer Wert in diesem Zusammenhang ist der MTTR-Wert, der die durchschnittlich zu erwartende Zeitdauer vom Auftreten eines Fehlers bis zum Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme einer Maschine angibt [VDI-05]. Er setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen [DIN-02]:

- Mittlere administrative Verzugsdauer (MAD)
- Mittlere logistische Verzugsdauer (MLD)
- Mittlere Reparaturdauer (MRT)
- Mittlere technische Verzugsdauer (MTD)

In der Praxis werden allerdings oft nur die mittlere Reparaturdauer und die technische Verzugsdauer berücksichtigt, da die Reaktionszeit und die Ersatzteilbeschaffung größeren zeitlichen Schwankungen unterliegen. Die Reaktionszeit des Kundendienstes wird von den meisten Kunden zusätzlich verlangt und ist damit ebenfalls von Bedeutung. Die Berechnung der Mittleren Wiederherstellungszeit nach einer Störung wird folgendermaßen berechnet:

$$MTTR = \frac{\text{Technische Ausfallzeit}}{\text{Anzahl der Ausfälle}} = \frac{T_T}{N} \quad (3-3)$$

Man kann die Mittlere Reparaturdauer auch als einen Indikator für die Reparaturfreundlichkeit einer Anlage sehen. Neben der Anlagenzuverlässigkeit bestimmt dieser Faktor entscheidend die Belastung, welcher sich die Instandhaltung ausgesetzt sieht. In untenstehender Abbildung wird der Zusammenhang der 2 Größen graphisch dargestellt.

Um die Materialkosten für Instandsetzungen zu berechnen, wird der MCRP-Wert definiert von DaimlerChrysler. Dieser Wert spiegelt die durchschnittlichen Ersatzteilkosten wider, die zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit einer Maschine benötigt werden.

$$MCRP = \frac{ETK_1 + ETK_2 + \dots + ETK_n}{n} \quad (3-4)$$

Dazu werden alle angefallenen Ersatzteilkosten (ETK) aufsummiert und durch die Anzahl der Störungen dividiert.

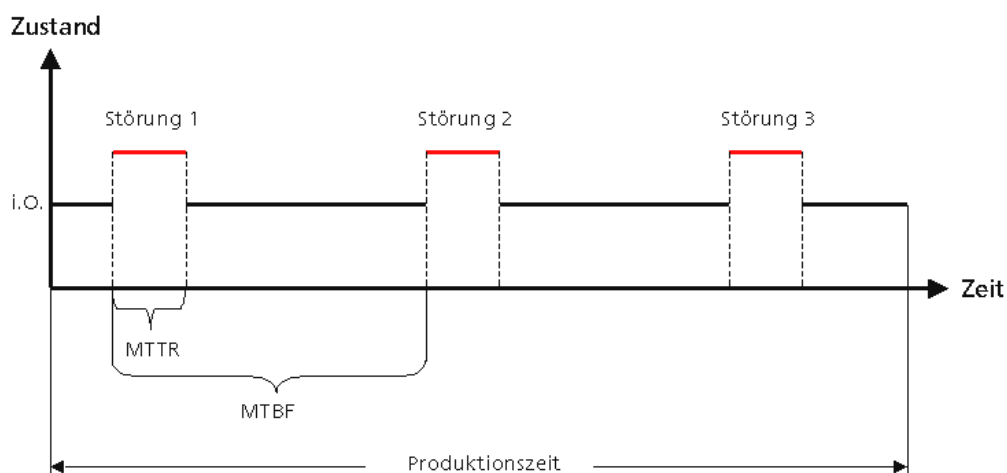


Abb. 3-1: Graphische Darstellung MTBF und MTTR [Dai-05]

Zuverlässigkeitskennwerte

In einer Maschine sind viele Einzelkomponenten verbaut, deren reibungsloses Zusammenspiel dafür sorgt, dass auf dem Produktionssystem ohne Funktionsunterbrechung fehlerfreie Teile bearbeitet werden. Da der Ausfall einer Baugruppe dafür sorgt, dass die Maschine nicht mehr störungsfrei produzieren kann, geht man von einer Serienstruktur aus. Hierbei ist der rechnerische Aufwand im Gegensatz zu einem Parallelsystem, das mit redundanten Baugruppen ausgestattet ist, um die Verfügbarkeit zu erhöhen, deutlich geringer. Für den System MTBF- und den System MTTR-Wert einer Anlage gelten daher folgende Beziehungen [Bir-97]:

$$MTBF_{Sys} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}} \quad (3-5)$$

$$MTTR_{Sys} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i} * MTTR_i \right) * MTBF_{Sys} \quad (3-6)$$

Verfügbarkeit

Unter der Verfügbarkeit A (engl. Availability) versteht man die Wahrscheinlichkeit oder auch den Zeitanteil dafür, dass während eines Betrachtungszeitraums keine maßgeblichen Störungen vorliegen, die die vorgesehene Funktionsweise der Maschine beeinträchtigen [VDI-86b]:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3-7)$$

Anzumerken ist, dass dieser Kennwert nur bei Dauerbetrieb einer Maschine eine sinnvolle Aussage zur praktischen Verfügbarkeit liefern kann, da nur zwischen Arbeits- und Reparaturzustand unterschieden wird [Bir-97]. Organisatorische und wartungsbedingte Ausfallzeiten finden deshalb keine Beachtung. Beide können nämlich um viele Prozentpunkte höher liegen als die technische Ausfallzeit. Damit gibt die Verfügbarkeit Aufschluss über den technischen Zustand einer Anlage, sofern man Bedienfehler nicht in diese Betrachtung mit einschließt.

3.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Ausfallverhaltens

Exponentialverteilung

Mit der Exponentialverteilung können Berechnungen zum Ausfallverhalten sehr einfach durchgeführt werden. Sie besitzt die Eigenschaft, ein konstantes und zeitunabhängiges Ausfallverhalten darstellen zu können. Es besteht das Prinzip der Gedächtnislosigkeit (auch Vergangenheitslosigkeit), was bedeutet, dass egal wie lange eine Untersuchungseinheit schon fehlerfrei funktioniert hat, dies keinen Einfluss auf das weitere Ausfallverhalten haben wird [Bir-97]. Diese Eigenschaft vereinfacht die Bestimmung von Zuverlässigkeitswerten erheblich, ist jedoch nicht immer für die Bestimmung des Ausfallverhaltens im Maschinenbau geeignet. Dagegen ist das Ausfallverhalten elektronischer Bauteile fast immer mit der Exponentialverteilung darstellbar. Am meisten Sinn macht es also die Exponentialverteilung anzuwenden, wenn ein Verschleiß praktisch ausgeschlossen werden kann. Die Ausfallwahrscheinlichkeit lässt sich mit

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\eta}} \quad (3-8)$$

beschreiben. Die Variable t steht dabei für die Beanspruchungszeit und η für den Erwartungswert der Verteilung, dessen Kehrwert die Ausfallrate λ darstellt [Ber-99].

Weibullverteilung

Mit der Weibull-Verteilung lassen sich verschiedenste Szenarien von Ausfallverhalten geeignet modellieren, unabhängig davon, ob die Ausfallrate zu- oder abnimmt oder sich nicht verändert. Für Maschinen oder Anlagen muss ein kontinuierlich wirkender Parameter wie z.B. die Dauer bis zum Ausfall aufgezeichnet werden. Der wichtigste Vorteil gegenüber anderen Lebensdauer-Verteilungen ist, dass selbst kleine Stichproben mit wenigen Ausfällen immer noch ordentliche Aussagen liefern [DIN-04].

Man unterscheidet generell zwischen der 2-parametrischen und der 3-parametrischen Weibull-Verteilung, wobei die 2-parametrische Verteilung die meistverbreitete Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Analyse von Lebensdauerdaten ist. Die 3-parametrische Verteilung ist nur bei größeren Stichproben anwendbar, bietet aber den Vorteil, eine ausfallfreie Anfangszeit mit zu berücksichtigen.

sichtigen [DIN-04]. Die Verteilung der 2-parametrischen Weibull-Verteilung sieht folgendermaßen aus und stellt auch gleichzeitig die Ausfallwahrscheinlichkeit dar:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3-9)$$

Ergänzend lässt sich auch die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ und die Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibullverteilungsfunktion $f(t)$ formulieren [Ber-99]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3-10)$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3-11)$$

Dabei stellt t die Zeit-Variable dar, der Parameter η gibt die charakteristische Lebensdauer an und β ist der Formparameter der Verteilung. Durch β wird dargestellt wie sich die Ausfallrate entwickelt. Bei $\beta < 1$ beobachtet man eine vom betrachteten Zeitpunkt an abnehmende Ausfallrate. Für $\beta = 1$ erhält man die Exponentialverteilung, die eine konstante Ausfallrate beschreibt und für $\beta > 1$ steigt die Ausfallrate vom betrachteten Zeitpunkt ab zunehmend an [VDI-86a]. Bei einem Wert von $\beta = 3,4$ erhält man näherungsweise die Normal-Verteilung. Insgesamt lässt sich mit den verschiedenen Mitgliedern der Familie von Weibullverteilungen ein weiter Datenbereich analysieren. Der Parameter η steht - wie beschrieben - für die charakteristische Lebensdauer, d.h. zur Zeit $t = \eta$ sind 63,2% der Einheiten ausgefallen. Da η unabhängig von β ist, gilt dies für alle Weibullverteilungen, wie untenstehende Gleichung zeigt.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\eta}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-1^\beta} = 1 - (1/e) = 0,632 \quad (3-12)$$

Badewannenkurve

Das Ausfallverhalten einer Maschine kann mit der Ausfallrate $\lambda(t)$ beschrieben werden, welche die Wahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt t dafür angibt, dass ein Teil ausfällt, wenn es bereits bis zu diesem Zeitpunkt t überlebt hat. Wenn man das gesamte Ausfallverhalten einer Maschine mit der Ausfallrate $\lambda(t)$ beschreibt, kommt man zur Badewannenkurve. Die Badewannenkurve gibt eine vereinfachte, aber sehr anschauliche Darstellung der Wirklichkeit wieder. Sie ist unterteilt in 3 Bereiche: Der Bereich der Frühausfälle, zu Beginn des Lebenszyklus, der Bereich der Zufallsausfälle, während der Nutzungsphase und der Bereich der Verschleißausfälle. Frühausfälle basieren meist auf Konstruktions- oder Montagefehlern, können aber auch an fehlerhaften Zulieferteilen oder schlecht programmierter Software liegen. Solche Fehler haben ihren Ursprung in der Entstehungsphase der Maschine und werden z.B. durch unzureichende Prüfung und Endkontrolle erst beim Kunden sichtbar. Behoben werden können sie meist recht schnell durch Umbau oder Reparatur und gehen zu Lasten des Herstellers. Die Ausfallrate in diesem Bereich ist durch einen degressiven Verlauf gekennzeichnet. Nach Beseitigung dieser Frühausfälle sinkt die Ausfallrate auf ein konstantes Niveau. In der Nutzungsphase kommt es vereinzelt zu Zufallsausfällen. Eine Hauptursache dieser Ausfälle ist in menschlichem Fehlverhalten zu sehen, d.h. Bedienfehler oder falsche Wartung. Sofern es dem Gesamtsystem nicht schadet und die Verfügbarkeit nicht merklich beeinträchtigt wird, werden in der Praxis kleine „Bugs“ in Software oder Programmierung häufig nicht gleich behoben. Da der Aufwand für ihre Beseitigung oftmals größer ist als der dadurch angerichtete Schaden, werden diese kurzen Ausfälle zumindest bis zur nächsten Inspektion in Kauf genommen. Sobald die Maschine ihre geplante Einsatzdauer überschritten hat, wird auch die Anzahl der Verschleißausfälle mit pro-

gressivem Verlauf ansteigen, da die Lebensdauer einiger Funktionsbauteile ihre Grenzen erreicht hat und es zu Veränderung oder Ermüdung der Materialien gekommen ist [Ber-99].

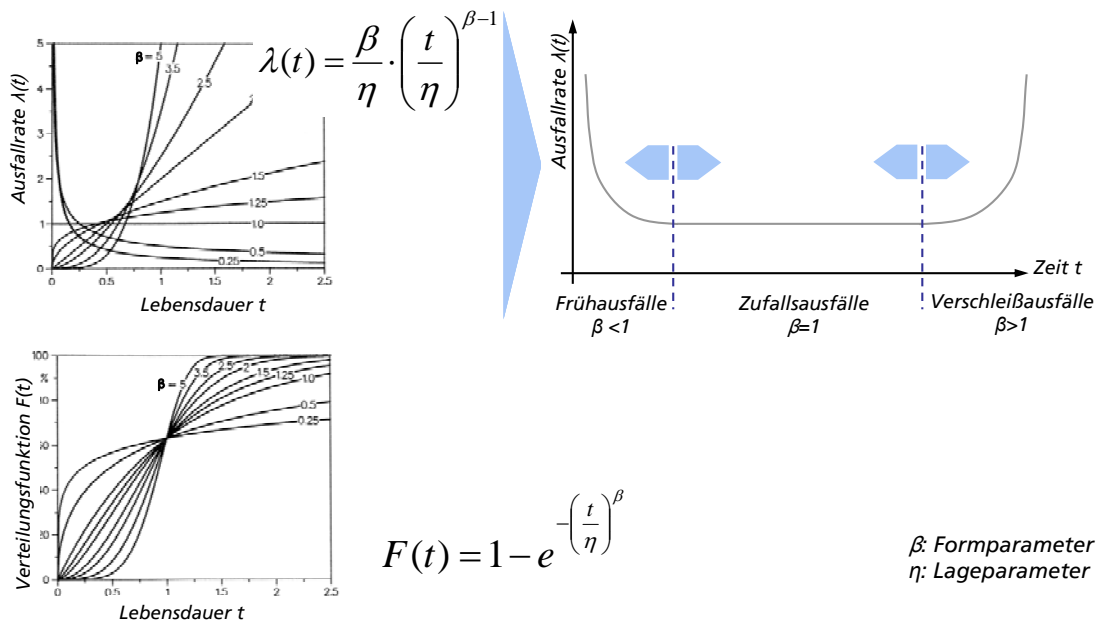


Abb. 3-2: Weibull-, Exponentialverteilung und Badewannenkurve (in Anlehnung an Ber-99)

4 Ergebnis der Projektarbeitspakete

Das Projekt ViLMA ist in 6 Arbeitspakete gegliedert (vgl. Abb. 2-1), die gemäß Abbildung 4-1 in Zusammenhang stehen.

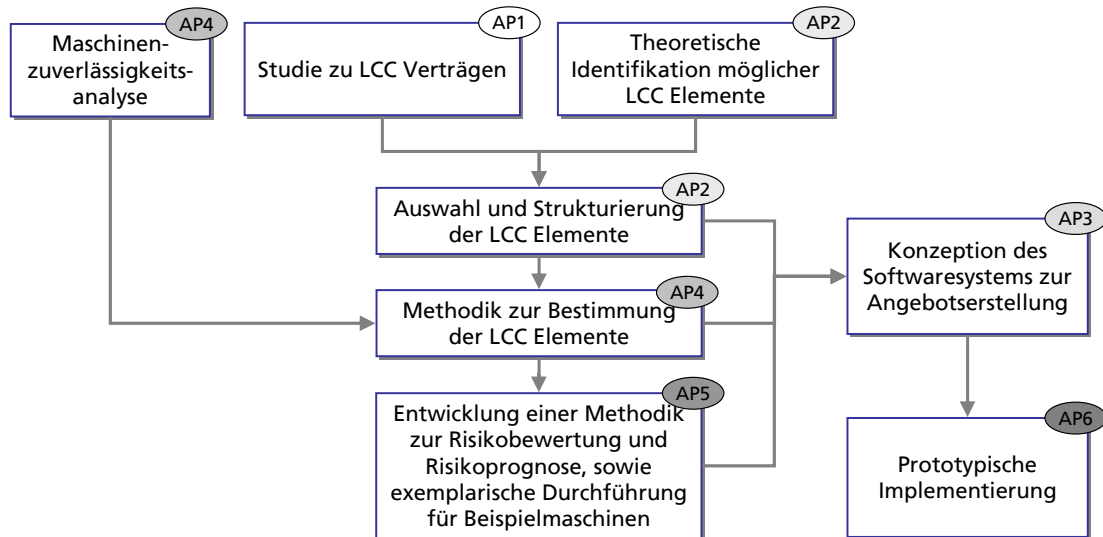


Abb. 4-1: Arbeitspakete und deren Interaktion

4.1 Praxisstudie zu aktuellen LCC Verträgen (AP1)

Das Arbeitspaket 1 hat das Ziel durch Recherchen, Umfragen, Unternehmensbefragungen und Interviews den Stand der Praxis im Themenbereich Life-Cycle-Costing zu ermitteln. Dazu wurden insgesamt 22 Unternehmen befragt, wovon 10 Betreiber und 12 Hersteller von Maschinen und Anlagen sind. Auf diese Weise lassen sich die aktuellen Anforderungen der Kunden des Maschinen- und Anlagenbaus anhand der relevanten Fallbeispiele übersichtlich darstellen.

Die Ergebnisse dieser Befragung finden auch Eingang in Arbeitspaket 2 (Kap. 4.2). Die Untersuchung wurde im Quartal 3 2005 abgeschlossen. Änderungen der Konzepte, die danach in Kraft traten, sind in der vorliegenden Beschreibung nicht berücksichtigt. Die meisten Informationen beruhen auf Befragungen und Interviews und sind somit kritisch zu hinterfragen.

4.1.1 DaimlerChrysler

DaimlerChrysler verlangt bei der Angebotserstellung für eine Werkzeugmaschine vom Maschinenhersteller Angaben zu Zuverlässigkeit und Lebenszykluskosten der zu fertigenden Maschine. Dabei handelt es sich nicht um eine Betrachtung der kompletten Maschine, sondern es werden nur ausgewählte Komponenten berücksichtigt. Dieses Vorgehen erlaubt eine einfache Vergleichbarkeit verschiedener Angebote bei gleichzeitiger Reduzierung des Aufwands. Ziel der TCO-Betrachtung ist die Minimierung der Gesamtkosten und die Steigerung der technischen Verfügbarkeit und Prozesssicherheit bei gleichzeitiger Optimierung der Instandhaltungskosten durch die Verbesserung der Komponentenstandzeit.

Inhalt eines LCC-Vertrags bei DaimlerChrysler

- Kopfdaten: Name und Adresse des Herstellers, Maschinenbezeichnung, Spezifikationen der Maschine, Ansprechpartner bei DaimlerChrysler und Hersteller
- Systemdaten: Geplante Betriebsdauer, Stückzahl und Produktionszeit
- Mitarbeiterschulungen durch den Hersteller für den Umgang und die Wartung der neuen Maschine
- Erstausrüstung mit mechanischen und elektrischen Ersatzteilen
- Prozedur und Bedingungen der Endabnahme bei DaimlerChrysler, nach der erst die Garantiezeit beginnt
- Kennzahlen der neuen Maschinen in Form einer TCO-Datenabfrage
- Controlling der Kennzahlen
- Kostenaufteilungsmodell bei Maschinenstörungen
- Gesamtpreis für alle aufgeführten Leistungen

Das TCO-Konzept von DaimlerChrysler beruht darauf, die Maschine in sinnvolle Einheiten zu gliedern, anhand deren die Berechnung und die Festlegung von Soll-Verfügbarkeitskennwerten sinnvoll sind. Um diese kostenintensiven oder verschleißträchtigen Baugruppen zu identifizieren, werden auf der einen Seite Materialverbrauchsdaten aus dem Ersatzteillager herangezogen; zum anderen wird die Maschine in einem Teile-Stammbaum abgebildet, um eine sinnvolles Betrachtungslevel festzulegen. Der Fokus auf lediglich 6 – 8 kostenintensivste Baugruppen ermöglicht somit die Kontrolle über ca. 80% der Instandhaltungskosten.

Ein zentraler Bestandteil des LCC-Vertrages zwischen DaimlerChrysler und einem Werkzeugmaschinenhersteller ist die TCO-Datenabfrage in Form eines Excel-Dokuments. Aufbauend auf den hier vom Hersteller angegebenen Kennzahlen werden im eigentlichen Vertrag Controlling und Sanktionen geregelt.

Aufbau der TCO-Datenabfrage

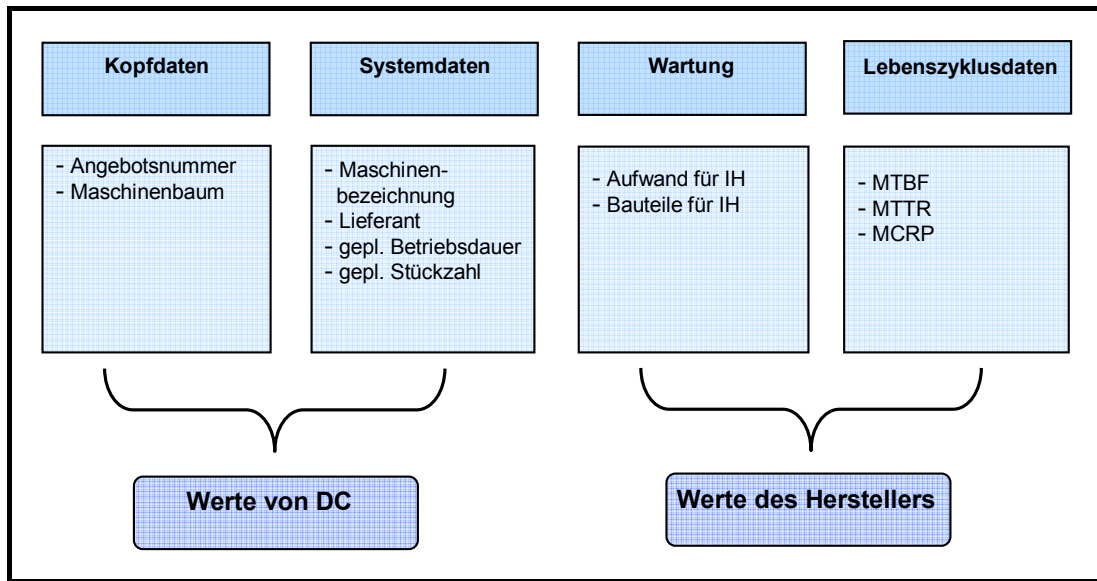


Abb. 4-2: TCO-Datenabfrage

Übersicht über den Gesamtprozess

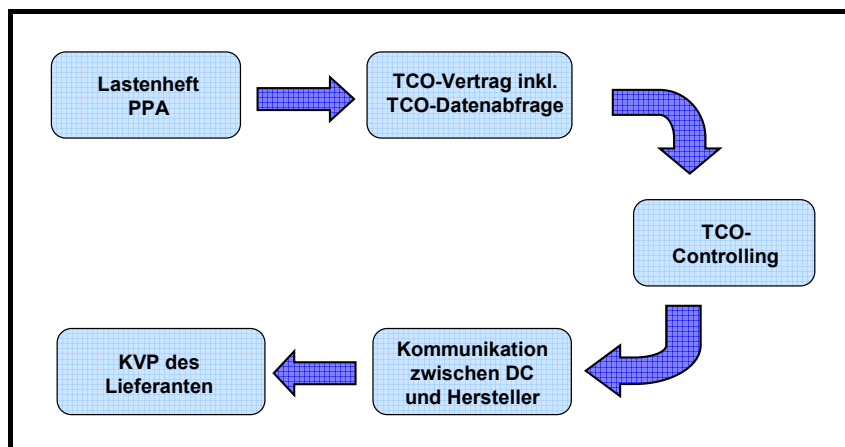


Abb. 4-3: Gesamtprozess

Verwendete Kennzahlen und deren Berechnung

- Aufwand für geplante Instandhaltungsumfänge
- Kosten für Bauteile für geplante Instandhaltungsumfänge
- Kosten für Verbrauchsstoffe für geplante Instandhaltungsumfänge
- MTBF
- MTTR
- MCRP

Berechnung des MTBF-Wertes

Die vom Maschinenhersteller angegebenen MTBF-Werte sollen unter Verwendung einer Exponentialverteilung für die Ausfalldaten berechnet werden, unabhängig davon, welche statistische Verteilung für die jeweils verwendeten Ausfalldaten am besten passt. Für die Ermittlung von MTBF-Werten aus untergeordneten Komponenten wird eine serielle Struktur der Bauteile zugrunde gelegt.

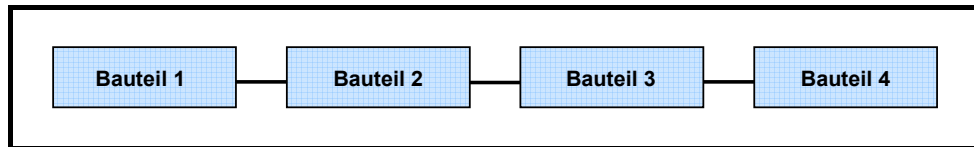


Abb. 4-4: Serielle Struktur

Berechnung des MCRP-Wertes

Die Abkürzung MCRP steht für *Mean Cost of Replacement Parts* und bezeichnet die durchschnittlichen Ersatzteilkosten für ungeplante Störungen, die eine Reparatur oder einen Bauteilwechsel zur Folge haben.

$$MCRP = \frac{\text{Ersatzteilkosten}}{\text{Anzahl Störungen}} \quad (4-1)$$

Controlling

- Im halbjährlichen Rhythmus werden Auswertungen der Kennzahlen durchgeführt; außerdem zusätzlich bei Schadenfällen.
- Der Maschinenhersteller sagt die von ihm angegebenen Lebensdauerdaten für die vereinbarte Betriebsdauer der Maschine vertraglich zu. Bei Abweichungen von diesen Kennzahlen ist der Hersteller verpflichtet Maßnahmen einzuleiten, um diese Werte zu erreichen. Diese Maßnahmen können sein: Umtausch, Reparatur, Nachbesserung, Anpassung der Konstruktion oder Ausführung etc.
- Kommt der Hersteller diesen Verpflichtungen nicht nach, kann DaimlerChrysler diese Maßnahmen entweder selbst durchführen oder dritte damit beauftragen, wobei die entstandenen Kosten dem Hersteller in Rechnung gestellt werden.
- Produktionsausfallkosten werden durch den Vertrag nicht abgedeckt.
- Einschränkung: die obigen Pflichten entstehen für den Hersteller nur, wenn alle von ihm vorgesehenen Wartungsarbeiten von Daimler Chrysler fach- und termingerecht durchgeführt wurden.

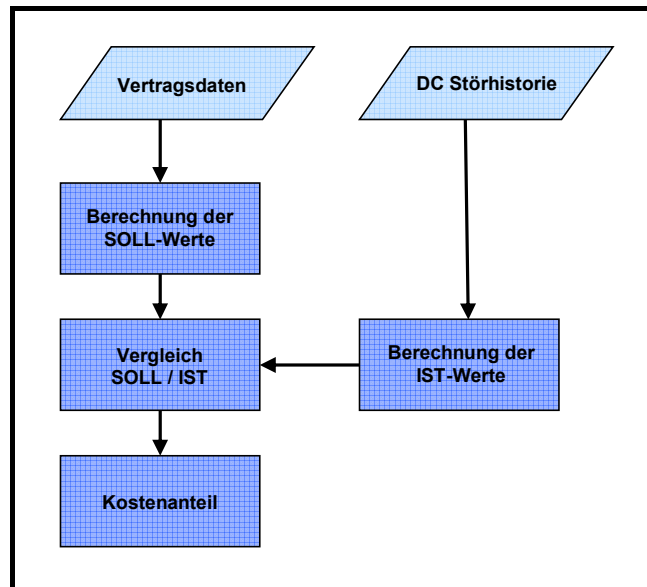


Abb. 4-5: TCO-Controlling

Die Zusammenarbeit mit dem Hersteller erfolgt nach der Anschaffungsphase in Form von Controllingaufgaben. Ziel dabei ist die zyklische Auswertung durch die Instandhaltung, die Fehleranalyse und gemeinsame Erstellung des erforderlichen Maßnahmenkatalogs sowie die Wiederherstellung der geforderten Soll-TCO-Kennzahlen.

Kostenaufteilungsmodell

grüner Bereich:

Die Anzahl der tatsächlich aufgetretenen Fehler der Maschine liegt unter dem Wert, der im LCC-Vertrag angegeben wurde (N_{Soll}), die Maschine läuft also besser als vertraglich garantiert.

gelber Bereich:

Die Anzahl der tatsächlich aufgetretenen Fehler übersteigt zwar die Gesamtzahl Fehler, die bis zu diesem Zeitpunkt laut Vertrag auftreten durften, sie liegt aber immer noch unter der Toleranzgrenze, die sich aus der 1,5-fachen Anzahl der vertraglich erlaubten Fehler errechnet.

roter Bereich:

Im roten Bereich übersteigt die Ist-Fehlerzahl auch die Toleranzgrenze. Allerdings wurde die maximal erlaubte Fehlerzahl N_{max} noch nicht überschritten.

Zeitpunkt	Störverhältnis	Kostenverhältnis Ersatzteile	Reparaturzeit- verhältnis	KF
während der Garantie	egal	egal	egal	1,00
außerhalb der Garantie				0,00
außerhalb der Garantie				0,50
außerhalb der Garantie				0,75
außerhalb der Garantie				0,88
außerhalb der Garantie				0,92
außerhalb der Garantie				1,00

Abb. 4-6: Kostenaufteilungsmodell

Die Tabelle oben gibt einen Auszug aus dem Kostenaufteilungsmodell von DaimlerChrysler wieder. Der Kostenaufteilungsfaktor (KF) gibt dabei an, welchen Anteil an den anfallenden Kosten vom Hersteller übernommen werden müssen: während der Garantie trägt er alle anfallenden Kosten, danach hängt die Aufteilung davon ab, wie das Verhältnis Ist-Werte zu Soll-Werte aussieht. Im für den Hersteller schlechtesten Fall muss dieser auch nach Ablauf der Garantiezeit alle Kosten für Reparaturen übernehmen, weil die von ihm gelieferte Maschine im Vergleich zu den vertraglich garantierten Leistungen zu schlecht abschneidet. Weiterführende Informationen zu Garantieaspekten finden sich bei BLISCHKE (vgl. /Bli-94/).

[Quelle: DaimlerChrysler Standard PPA]

4.1.2 Department of Defense - Directive Number 5000.1 [Dod-03]

Das Department of Defense hat 2003 das "Defense Acquisition System" überarbeitet. Es wird als Management-Prozess beschrieben, um technische Systeme effektiv, kostengünstig und pünktlich verfügbar zu machen. „[...] a management process by which the Department of Defense provides effective, affordable, and timely systems to the users.“

Zweck

Die Neuauflage ist als Ergänzung zur „DoD Instruction 5000.2 – Operation of the Defense Acquisitions System“ zu sehen und soll die Abwicklung sämtlicher Beschaffungsvorgänge unterstützen.

Anwendungsbereich

Die Direktive richtet sich an alle Abteilungen des Department of Defense. „[...] hereafter collectively referred to as the DoD Components“ und insbesondere an alle Beschaffungsprogramme der DoD-Abteilungen.

Grundsatz der Direktive

“The Defense Acquisition System exists to manage the nation's investments in technologies, programs, and product support necessary to achieve the National Security Strategy and support the United States Armed Forces. The investment strategy of the Department of Defense shall be postured to support not only today's force, but also the next force, and future forces beyond that“.

Die Aufgabe besteht darin, Beschaffungsvorgänge zu einem möglichst optimalen Kosten/Nutzen-Verhältnis durchzuführen. Ein Hauptaspekt ist die Beschaffung von hochqualitativen Produkten, die den Anforderungen der späteren Anwender gerecht werden und messbare Verbesserungen für den Militäreinsatz mit sich bringen. „The primary objective of Defense acquisition is to acquire quality products that satisfy user needs with measurable improvements to mission capability and operational support, in a timely manner, and at a fair and reasonable price“.

Folgende Aspekte beschreiben das “Defense Acquisition System“:

- Flexibilität

- Rücksprache

„Evolutionary acquisition strategies are the preferred approach to satisfying operational needs. *Spiral development* is the preferred process for executing such strategies“.

- Innovation

Der “Program Manager” sollte – soweit möglich – innovative Lösungen in das Beschaffungsprogramm einbeziehen. „PMs shall examine and, as appropriate, adopt innovative practices (including best commercial practices and electronic business solutions) that reduce cycle time and cost, and encourage teamwork“.

- Disziplin

Jeder Program Manager sollte Ziele des Beschaffungs-Programms definieren, welche die Minimierung der Kosten und der benötigten Zeit festlegen sowie die optimale Gestaltung der Performance-Kennzahlen des Systems beschreiben.

- Effektives Management

Die Verantwortungen im Beschaffungsprozess sollten dezentral angelegt sein, um eine möglichst hohe Effizienz und Praktikabilität zu erreichen.

Im Anhang der Direktive werden einige **weitere Aspekte** genannt, die bei der Beschaffung technischer Systeme zu beachten sind. Dazu zählen:

- Rüstungskoperationen

- Zusammenarbeit

“Teaming among warfighters, users, developers, acquirers, technologists, testers, budgeters and sustainers shall begin during capability needs definition“.

- Wettbewerb

Um bestmögliche Resultate zu erzielen, soll der Beschaffungsprozess durch einen offenen Wettbewerb unter den Anbieter charakterisiert sein. Im Anhang der Direktive lautet der Zusatz: „Competition shall provide major incentives to industry and Government organizations to innovate, reduce cost, and increase quality“.

- Kosten und Finanzierbarkeit

“[...] to the greatest extent possible, the MDAs (Milestone Decision Authority) shall identify the total costs of ownership, and at a minimum, the major drivers of total ownership costs”.

- realistische Kostenabschätzung

Anbieter sollen darin bekräftigt werden, realistische, verlässliche Kostenvoranschläge zu machen, die die Aufwendungen über den gesamten Lebenszyklus beinhalten. Die Kostangaben sind durch die „Federal Acquisition Regulation“ zu überprüfen. Spätere Kostenaufschläge durch Angebotserweiterungen sind zu vermeiden: „Buy-ins“ shall be discouraged because they may subvert competition or lead to poor contract performance or cost overruns.“

- Kostenteilung

Anbieter sollen aufgrund der Auftragsvergabe nicht ihre “profit dollars“ investieren müssen. Im Gesamtzusammenhang lautet der Vorsatz: „Contractors shall not be encouraged nor required to invest their profit dollars or independent research and development funds to subsidize defense research and development contracts, except in unusual situations where there is a reasonable expectation of a potential commercial application“.

- integrierte Tests und Performance-Bewertung

Dieser Vorgang soll in den Beschaffungsprozess integriert werden, um den Entscheidungsträgern wichtige Informationen über die Funktionalität des technischen Systems zu ermöglichen. „Test and evaluation shall be structured to provide essential information to decision-makers, assess attainment of technical performance parameters, and determine whether systems are operationally effective, suitable, survivable, and safe for intended use.“

- Produkte, Services und Technologien

In diesem Absatz wird noch einmal die Bedeutung der Lebenszyklus-Betrachtung aufgezeigt: „[...] the DoD Components shall seek the most cost-effective solution over the system’s life cycle.“

Es werden weitere Punkte genannt, die sich z.B. auf die allgemeine Sicherheit, Verlässlichkeit, Softwarestabilität etc. beziehen, ohne dass aber eine detaillierte Beschreibung aufgeführt wird. Es wird lediglich erwähnt, dass die genannten Punkte Bedeutung im Beschaffungsprozess haben sollen.

4.1.3 Deutsche Bahn (Konzeptidee)

Auf dem Weg zu einem international führenden Transport- und Logistikdienstleister gilt die Bahn als größter Investor in der Bundesrepublik Deutschland. Um die Lebenszykluskosten der angeschafften Güter zu erfassen und zu reduzieren, ist die Bahn dabei, LZK-Anforderungsprofile zu entwickeln, um diese bei der Neubeschaffung von Fahrzeugen und Gütern der Leit- und Sicherungstechnik von dem Lieferanten einzufordern. In besonderem Maß sollen auch bei bereits angeschafften Gütern vorhandene Potentiale ausgeschöpft werden, um die Kosten des Restlebenszyklus zu senken (vgl. auch Ziele der Lebenszykluskosten-Betrachtung).

Die zu betreibenden Güter der Deutschen Bahn AG sind in ihrer Art sehr unterschiedlich. Auf der einen Seite verfügt sie über einen umfassenden Bestand an Schienenfahrzeugen, zum anderen trägt die Bahn die Verantwortung für die Infrastruktur des Schienennetzes. Die Aufgaben des Bereichs Technik/Beschaffung im Ressort V (Systemverbund) umfassen:

- Unterstützung und Gestaltung technischer Produktionsmittel im Auftrag der Geschäftsfelder des DB Konzerns
- Sicherstellen der technischen Sicherheit, der Zuverlässigkeit und des Regelbetriebs

Die für die Lebenszykluskosten-Betrachtung relevanten Bereiche lassen sich demnach einteilen in

1. Fahrzeuge und
2. Leit- und Sicherungstechnik

Da sich die Rahmenbedingungen des Lebenszykluskosten-Ansatzes der Deutschen Bahn grundlegend von denen der Produzierenden Industrie unterscheiden, werden im nachfolgenden Abschnitt die signifikanten Unterschiede näher beschrieben und erklärt.

4.1.3.1 Rahmenbedingungen der Lebenszykluskostenbetrachtung

Folgende Rahmenbedingungen sind bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten von Gütern der Deutschen Bahn AG von großer Bedeutung:

Lebenszyklusdauer

Im Gegensatz zu Betriebsmitteln der Produzierenden Industrie, umfasst der Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen der Bahn einen wesentlich längeren Zeitraum. So ist allein die Dauer der Marktphase von Schienenfahrzeugen zwischen 10 und 30 Jahren. Bei Gütern der Leit- und Sicherungstechnik werden sogar weit größere Zeiträume erreicht. Ein Beispiel hierfür ist die Eisenbahnbrücke (> 50 Jahre), für deren Instandhaltung ebenfalls die Deutsche Bahn AG verantwortlich ist. Im Vergleich dazu erscheint die zugrunde gelegte zehnjährige Betriebsphase einer Fertigungsmaschine in der Automobilindustrie doch eher relativ kurz.

Diese langen Zeiträume bringen Auswirkungen mit sich, die die Lebenszykluskosten-Betrachtung bei der Bahn charakterisieren:

- Instandhaltung anstatt Neuanschaffung

Durch die immens hohen Investitionen bei der Neuanschaffung von Fahrzeugen und Gütern der Leit- und Sicherungstechnik, liegt der Fokus der Deutschen Bahn AG auf der Instandhaltung bereits bestehender Maschinen und Anlagen. Dadurch soll der Lebenszyklus der Investitionen signifikant verlängert werden. Die Bahn nutzt die Instandhaltung, um die Maschinen und Anlagen hinsichtlich ihrer Lebenszykluskosten-Performance möglichst optimal zu beeinflussen.

- Nachhaltigkeit

Gerade aber Investitionen, die über einen so langen Zeitraum zum Einsatz kommen (Eisenbahnbrücke), wurden in der Entstehungsphase nicht unter den Aspekten der Lebenszykluskostenrechnung entworfen und sind aus diesem Grund nur schwer nachträglich in

ihrer Performance beeinflussbar. Die monetäre Betrachtung "heutiger" Prägung konnten die Erbauer der Eisenbahn noch nicht in dem Maße.

- Verantwortungsbewusstsein

Bei der Bahn ist die Gefahr sowohl intern als auch über externe Lieferanten sehr groß, dass suboptimale, opportunistische Entscheidungen zu einem Zeitpunkt t getroffen werden, deren Auswirkungen z.B. in $t+50$ nicht mehr auf die damals Verantwortlichen zurückzuführen ist. Dieser Umstand erschwert die Lebenszyklusbetrachtung, bzw. die Sanktionierung bei Nichteinhaltung der vereinbarten Leistungsgrößen natürlich erheblich.

Sicherheitsaspekt

Was in der Produktionsindustrie der Prävention eines Produktionsausfalls dient, kommt in der Branche des Personentransports als Investition in die Sicherheit zum tragen. Die Art der Sanktionierung im Falle eines Maschinenausfalls ist aber sehr unterschiedlich. In der Automobilbranche z.B. sind es eher monetäre Beweggründe, im Personentransport (wie auch bei beim Militär und in der Fugbranche) stehen in erster Linie Menschenleben auf dem Spiel. Der Sicherheitsaspekt nimmt daher einen fixen Stellenwert ein und lässt die LZK-Betrachtung zu einem Wechselspiel zwischen Qualität und Kosten werden.

Bundshaushalt

Aber auch Rahmenbedingungen, die durch die Bindung an die Haushaltslage des Bundes entstehen, haben eine große Bedeutung und grenzen die Bahn von der Produzierenden Industrie ab. Denn die Mittel für Investitionen in die Infrastruktur werden – im Gegensatz zu den Investitionen in Schienenfahrzeuge – vom Bund getragen. Demnach muss sich die Deutsche Bahn AG bei der Beschaffung von Investitionskapital an die Haushaltsregeln des Bundes halten. Bis zum Jahresende müssen alle Fakten und Voraussetzungen für die Bewilligung der Mittel seitens der Bahn vorliegen.

Ausfallfolgen

Wie oben beschrieben, unterscheidet sich die Bahn gegenüber der Produzierenden Industrie in der Auswirkung eines Maschinen- oder Güterausfalls, da Menschenleben auf dem Spiel stehen. Neben dieser extremen Sanktionierung, gibt es aber auch weitere charakteristische Folgen eines Ausfalls, mit denen die Bahn konfrontiert ist und die es in der Form in der Produzierenden Industrie nicht gibt.

- kein redundantes System

Fällt ein Schienenfahrzeug aus, kann der Betrieb im Gegensatz zu einem industriellen Produktionsprozess nicht 1:1 durch ein redundantes System fortgeführt werden, da dies ein exakt parallel verlaufendes zweites Schienensystem voraussetzen würde, um Ausfälle kompensieren zu können.

- hoher Vernetzungsgrad

Um den Personen- und Gütertransport trotz eines Ausfalls aufrecht zu erhalten, sind hohen Anforderungen an die Leit- und Sicherungstechnik gestellt, die die blockierte Stelle im Schienennetz möglichst effizient durch alternative Wege ersetzen müssen. Diese Veränderungen bringen aber durch den hohen Vernetzungsgrad ihrerseits wieder Auswirkungen auf weitere Netzabschnitte mit sich, die ebenfalls koordiniert werden müssen.

Im „worst case“ wird ein Ausfall über die regionalen Steuereinheiten bis hin zur zentralen Steuereinheit koordiniert, was ein progressives Wachstum der Planungskomplexität bedeutet.

- Timing und Image

Ausfälle und Verspätungen wirken sich durch den direkten Kundenkontakt sofort auf die Kundenzufriedenheit, bzw. auf das Image der Bahn aus. Im Marketing gibt es für Produkte und Dienstleistungen die Einteilung in *Untererfüllung*, *Erfüllung* und *Übererfüllung*. Entscheidend dabei ist, dass die fehlerfreie pünktliche Erfüllung der Dienstleistung nicht zu einer höheren Kundenzufriedenheit beiträgt, da sie als selbstverständlich verstanden wird. Verspätungen oder Untererfüllungen wirken sich dagegen überproportional schlecht auf die Kundenzufriedenheit aus.

4.1.3.2 Ziele der Lebenszykluskostenbetrachtung

Da die einzelne Neubeschaffung von Schienenfahrzeugen sehr hohe Investitionen bedeutet und finanziell nur in einem mehrjährigen Turnus möglich ist, liegt der Fokus der Lebenszykluskostenbetrachtung der Deutschen Bahn AG auf Gütern, die sich bereits in der Betriebsphase befinden. Die Ziele der Lebenszykluskostenbetrachtung der Deutschen Bahn spiegeln sich in folgenden Punkten wider:

- Minimierung der Herstellkosten des Lieferanten und damit des Anschaffungspreises durch vorgegebene Zahlen aus dem Target Costing
- Optimierung des Grads der Instandhaltbarkeit

Dies soll insbesondere dadurch erreicht werden, dass relevante Kostentreiber (Baugruppen, technische Einheiten) identifiziert werden und die Zugänglichkeit zu diesen Teilen verbessert wird. Allerdings sind die in der Konstruktions- und Entstehungsphase getroffenen Entscheidungen kaum oder sehr schwer im späteren Lebenszyklus der Maschine veränderbar. In diesem Punkt sieht sich die Instandhaltung der Deutschen Bahn einer großen Herausforderung entgegen.

- einheitliche Bedienbarkeit der Schienenfahrzeuge

Bisher müssen die Lokführer für die Bedienung sämtlicher Fahrzeugbaureihen geschult werden, was entsprechend hohe Kosten bedeutet. In Anlehnung an das Bedienkonzept eines Flugzeug-Cockpits, soll die funktionale Anordnung von Bedienelementen zur Steuerung des Schienenfahrzeugs in Zukunft über Baureihen hinweg vereinheitlicht werden.

Um diese Ziele umsetzen zu können, ist für die Bahn in erster Linie zu klären, ob sich die Lebenszykluskosten bei Gütern, die sich bereits in der Betriebsphase befinden, überhaupt noch beeinflussen lassen. Die nötigen Anstrengungen, um diese vorausgehende Frage zu beantworten, gleicht einem Kraftakt, wobei nicht sicher ist, ob die Deutsche Bahn AG diesen momentan zu leisten im Stande ist.

4.1.3.3 Tendenzen in der LZK-Betrachtung der DB AG

Folgende Aspekte beschreiben die LZK-Betrachtung aus Sicht der Deutschen Bahn AG:

- Die DB AG verfolgt zahlreiche Wege, um die Lebenszykluskosten zu steuern.
- der Schwerpunkt wird derzeit auf die Festlegung einer einheitlichen Methodik für ein LC-Management gelegt (basierend auf diversen Erfahrungen bei den verschiedenen Produktionsmitteln).
- Im Rahmen des LC-Managements werden Entscheidungsunterstützungen für das Management erarbeitet. Es geht immer um die vergleichende Beurteilung von zu erwartenden Lebenszykluskosten verschiedener Varianten (hinsichtlich Technik, Betriebseinsatz, Instandhaltungsprogramm, ...).
- In diesem Kontext wird auch abzuschätzen sein, wie sich das Verhältnis des Aufwandes (Datenvorhaltung und Analyse) zu den Effekten des LC-Managements gestalten lässt.
- von Interesse ist auch die Identifikation der verschiedenen verantwortlichen Bereiche und Beteiligten, die Einfluss auf die LZK durch deren Entscheidungen nehmen und wie eine geeignete Steuerung im Sinne des LC-Managements möglich ist.

4.1.4 Fiat Powertrain

Fiat Powertrain verlangt von seinen Maschinenlieferanten bereits vor dem Bau der Maschine umfassende Analysen und Angaben zu anfallenden Instandhaltungsumfängen und Zuverlässigkeitskennwerten. Im Angebot zur Maschine müssen die Kennwerte Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Unzuverlässigkeit und der Wirkungsgrad angegeben werden. Diese Anforderungen und alle Verweise auf die im Folgenden benannten Bestimmungen werden der Fiat Norm „Maschinen und Anlagenspezifizierung – Instandhaltung von Maschinen und Anlagen“ entnommen.

Während der Konstruktionsphase sollen systematisch Instandhaltbarkeit und Verfügbarkeit der konstruktiven Lösungen sichergestellt werden und auf ihre Kompatibilität zur Gesamtanlage überprüft werden. Dazu sind folgende Hilfsmittel vorgesehen:

- Analyse kritischer Zustände industrieller Anlagen
- Leitfaden Wartungshandbuch
- Berechnung von Größenauslegungen
- Simulation bei einer gesamten Fertigungslinie

Zum frühest möglichen Zeitpunkt in der Konstruktionsphase sollte die Analyse kritischer Zustände industrieller Anlagen (Criticality Analysis for Industrial Equipment) durchgeführt werden. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei in drei Teilschritte:

1. Herunterbrechen der Maschine auf Komponentenebene

In diesem Teil soll die Maschine so aufgeschlüsselt werden, dass die kritischen Komponenten der Anlage identifiziert werden können. Dazu wird das technische System in vier Hierarchiestufen, so genannten Levels, eingeteilt (siehe Abbildung 4-7). Auf der ersten Stufe sollen die Teilsysteme einer Gesamtanlage wie z.B. Fördersystem oder Schweißsys-

tem benannt werden und jedes mit einem 5-stelligen Zahlenschlüssel belegt werden. Auf der zweiten Ebene sollen die Maschinengruppen (Hydraulik, Kühlsystem, etc.) und in Level drei die Baugruppen hinterlegt sein. Auf der vierten Stufe werden dann die kritischen Komponenten betrachtet und die jeweilige Anzahl vermerkt.

MACHINE BREAKDOWN								
LEVEL I		LEVEL II		LEVEL III		LEVEL IV		
C	STATION	C	ASSEMBLY	C	SUBASSEMBLY	C	CRITICAL COMPONENT	Q
	SUBSYSTEM							
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Abb. 4-7: Maschinenunterteilung in vier Hierarchieebenen

Für die Teilsysteme („subsystems“) der Maschinen werden schematische Layouts verlangt, in denen Referenzen bis hin zur dritten Stufe hergestellt sind. Es müssen immer alle drei Levels aufgelistet werden, auch wenn keine kritischen Bauteile vorhanden sind. Um ein Teil als kritisches Bauteil zu deklarieren, müssen folgende Beziehungen gelten, wobei n die Anzahl der betrachteten Komponenten darstellt:

$$\frac{MTBF [\text{Jahre}]}{n} \leq 3 [\text{Jahre}] \quad (4-2)$$

$$\frac{MTBF [\text{Stunden}]}{n} \leq 15.000 [\text{Stunden}] \quad (4-3)$$

2. FMECA (Fehler-Möglichkeits-Einfluss und Risiko-Analyse)

Die FMECA soll für die Level IV-Komponenten der Maschine durchgeführt werden. Dazu werden in einem Formblatt potenziell auftretende Fehlerarten, deren Ursache und möglichen Warnsignale festgehalten. Ebenso soll der Einfluss auf den Produktionsfluss, die Auswirkung auf die Werkstücke und die zum Wiederherstellen der vollen Funktionserfüllung benötigten Werkzeuge beschrieben werden. Die MTBF- und MTTR-Werte, die bereits für die Komponenten angegeben worden sind, werden auch hier benötigt und fließen in die Berechnung des Gefahrenindex C mit ein, welcher bestimmt, wie kritisch ein spezielles Bauteil anzusehen ist.

$$C = \frac{MTTR}{MTBF} * (1 - \text{Flussfaktor}) \quad (4-4)$$

Der Flussfaktor beschreibt die Auswirkung eines Ausfalls auf den Produktionsfluss und kann Ausprägungen von „ungehinderter Fluss“ (Wert 4) bis „Stillstand“ (Wert 1) annehmen. Das Verhältnis aus MTTR und MTBF gibt die Instandhaltbarkeit des Bauteils an. Daraufhin sollen Maßnahmen formuliert werden, welche die Gesamtverfügbarkeit erhöhen. Dies können konstruktive Änderungen oder auch vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen sein. Diese Änderungen berücksichtigend, sollen dann erneut MTBF, MTTR, Instandhaltbarkeit und der Gefahrenindex berechnet werden.

Zum Schluss werden dann im Bottom-up Verfahren die MTBF- und MTTR-Werte für die Gesamtmaschine ermittelt sowie die Gesamtverfügbarkeit der Maschine bestimmt.

3. Ersatzteilliste

Die Angaben zu Ersatzteilen sollen den Aufwand für die Wiederbeschaffung abschätzen bzw. erleichtern. So werden beispielsweise die Zeichnungsnummer und die Anzahl der jeweils verbauten Teile gefordert. Zudem wird die MTBF für jede Komponente und die Gesamt-MTBF für Gleichteile verlangt. Darüber hinaus sollen der Preis, die Lieferzeit ab Bestellung und die werksnächste Beschaffungsmöglichkeit für jede Komponente angegeben werden. Damit will Fiat sicherstellen, dass Komponenten im Bedarfsfall möglichst schnell wiederbeschafft werden können. Wie im „Leitfaden Wartungshandbuch“ beschrieben, sind die geplanten Instandhaltungs-Umfänge für die Maschine zu ermitteln. Diese sollen in drei Gruppen untergliedert und benannt werden.

1) Instandhaltung durch Instandhaltungspersonal

Elektrik

Mechanik

Fluidtechnik

2) Instandhaltung durch den Bediener

Reinigung

Schmierung

Inspektion

3) Vorbeugende Geräteinstandhaltung

Vibrationsanalyse

Thermographische Analyse

Druck- und Energiekontrolle

Kontrolle der Verschmutzung von Hydraulik- und Schmierungssystemen

Noch in der Konstruktionsphase und bevor der tatsächliche Bau der Maschine beginnt, muss ein Treffen mit Fiat und dem Maschinenlieferant stattfinden, in dem folgende Punkte geklärt werden:

- Bestätigung der FMECA.
- Abgleich der Ersatzteilliste mit der FMECA.
- Überprüfung der Konsistenz des Instandhaltungshandbuchs mit der FMECA.
- Abschätzung der Mannstunden für die Montage.
- Überprüfung, ob bei der Konstruktion alle Bestimmungen eingehalten wurden.
- Vorbereitung des Instandhaltbarkeitstest und der Vibrationsanalyse.

Erst wenn diese Angaben, ggf. nach Änderung von Fiat, freigegeben werden, kann der Bau der Maschine beginnen. Die Anforderungen von Fiat gehen mit der Forderung nach der recht aufwändigen FMECA damit in eine etwas andere Richtung, als dies z.B. bei DaimlerChrysler der Fall ist und ähnelt eher der Vorgehensweise bei Ford. Darüber hinaus muss aber die Forderung von Fiat auf drei Jahre Garantie als deutlicher Kostenfaktor für den Maschinenhersteller gesehen werden. Bei Fiat steht aber nicht die Möglichkeit im Vordergrund, den Hersteller im Falle einer technischen Störung in Regress zu nehmen. Vielmehr soll im Vorfeld, u.a. durch die FMECA, das Risiko häufiger Störungen minimiert werden.

4.1.5 Ford Motor Company

Bei der Ford Motor Company muss im Rahmen eines Angebotsprozesses gemäß Abbildung 4-8 ein Maschinenhersteller einen Plan zu seinem R&M-Programm (Reliability and Maintainability) einreichen. Mit diesem Programm soll die Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit von Produktionsanlagen garantiert und langfristig verbessert werden. Außerdem sollen die Betriebskosten gesenkt werden. Das R&M Programm gliedert sich in folgende drei Punkte:

1. Prüfungsrichtlinien
2. 5 Punkte Prozess
3. Revision nach 6-monatiger Betriebsdauer

Die Prüfungsrichtlinien stellen den Rahmen der technischen und konstruktiven Anforderungen für Produktionsmaschinen dar. Die Basis des R&M-Programms von Ford bildet der 5-Punkte-Prozess, der im Folgenden erläutert wird. Die Revision nach 6-monatiger Betriebsdauer dient der Kontrolle der im Angebot festgelegten Parameter und der Ausführung des Programms.

Ford akzeptiert ausschließlich Angebote von Herstellern, die den so genannten „Grünen Status“ erworben haben. Dieser Status wird von Ford an die Tier1- und Tier2-Zulieferer (Tier1 = Hauptlieferant, Tier2 = Unterlieferant) verliehen, die den Anforderungen des R&M-Programms gerecht werden. Durch die Zertifizierung soll eine langfristige Zusammenarbeit zwischen Ford und den Maschinenherstellern gewährleistet werden. Auch die Maschinenhersteller dürfen ihrerseits wiederum nur Teile von Unterlieferanten mit „Grünem Status“ verwenden.

Hersteller, die ein Angebot einreichen, jedoch den „Grünen Status“ nicht besitzen, werden von der zuständigen Ford R&M-Abteilung solange geprüft bis sie die Anforderungen der Zertifizierung erfüllen. Dafür steht dem Hersteller ein Zeitraum von sechs Monaten zur Verfügung.

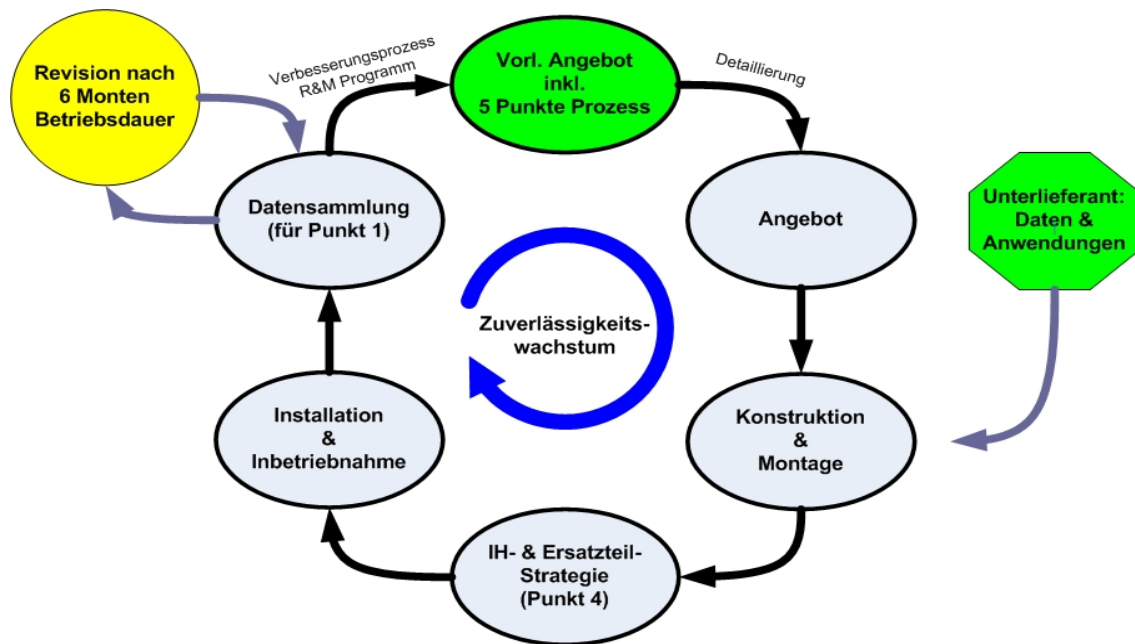


Abb. 4-8: Gesamtprozess zur Ermittlung der LCC bei Ford

5 Punkte Prozess:

Die Ausführung des 5 Punkte Prozesses obliegt der Verantwortung des Herstellers, allerdings wird er bei seiner Ausführung von dem zuständigen Ford-Ansprechpartner unterstützt. Für jede Maschine muss während des Angebotsprozesses ein Nachweisbuch erstellt werden, welches die Ausführung des Prozesses detailliert beschreibt. Der 5 Punkte Prozess beinhaltet im Einzelnen:

1. Felddatenanalyse
2. Zuverlässigkeits-Wachstum Plan
3. Zuverlässigkeits- und Instandhaltungsdaten der Unterlieferanten
4. Instandhaltung und Ersatzteile
5. Life Cycle Costing Daten

1. Felddatenanalyse

Das Ziel der Analyse ist die Untersuchung und Darstellung des Maschinenverhaltens im Feld. Für die Analyse soll der Hersteller verschiedene Datenquellen wie die Betriebsdatenerfassung, Instandhaltungsdaten, Daten von Garantieleistungen sowie Daten von Serviceeinsätzen verwenden. Durch Interviews mit Bedien- und Wartungspersonal sowie mit dem Management soll die Datengrundlage vervollständigt werden. Auf dieser Basis sollen folgende Informationen berechnet und im so genannten FRED-Baum (Failure Reporting Evaluation and Display) dargestellt werden:

- operationeller FRED-Baum:

Analyse, Prognose und Simulation der Kennwerte MTBE (Mean Time Between Events), MTTR (Mean Time To Repair) und der Verfügbarkeit unter Berücksichtigung aller technischen Fehler (mit und ohne Materialeinsatz) inklusive Kleinstörungen einer Maschine.

Darüber hinaus sollen Zeiten für Werkzeugwechsel, Werkstückprüfung, Wartung sowie alle weiteren Wartezeiten in die Berechnung eingeschlossen werden. (Software Vorgabe: Reliasoft Weibull 6++ und BlockSim).

- technischer FRED-Baum:

Analyse, Prognose und Simulation der Kennwerte MTBF (Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair) und der Verfügbarkeit unter Berücksichtigung aller technischen Fehler (mit und ohne Materialeinsatz) einer Maschine. (Software Vorgabe: Reliasoft Weibull 6++ und BlockSim).

Die Ergebnisse sollen in Verbindung mit dem Angebot an Ford weitergegeben werden, um die Bewertung und eine Produktionssimulation zu unterstützen. Um die Angaben des Maschinenherstellers richtig beurteilen zu können, sollen darüber hinaus weitere Informationen enthalten sein wie:

- Beschreibung der untersuchten Anlage und deren Standort
- Darstellung der Annahmen und Rahmenbedingungen der Berechnung
- Darstellung der Datengrundlage und deren Quellen
- Alle Reliasoft Weibull- und BlockSim-Dateien

2. Zuverlässigkeits-Wachstum Plan:

Einer der wichtigsten Punkte des R&M-Prozesses ist die kontinuierliche Verbesserung der Zuverlässigkeit von Produktionsanlagen durch konstruktive Änderungen. Dies kann nur mit Hilfe der Felddatenanalyse auf Komponenten und Prozessebene erfolgen. Das Zuverlässigkeitswachstum einer Produktionsanlage wird erreicht durch:

- Datenanalyse zur Identifikation der Hauptfehlerarten
- Identifikation der Fehlerursache
- Konstruktive Lösungen
- FMEA der konstruktiven Änderungen
- Nachweis über die Effektivität der Änderung

3. Zuverlässigkeits- und Instandhaltungsdaten der Unterlieferanten

Von den Unterlieferanten (Tier2) wird erwartet, dass sie die Anwendungen genau untersuchen, für die ihre Komponenten eingesetzt werden, um zuverlässige Kennwerte angeben zu können. Außerdem müssen auch von einem Unterlieferanten die einzelnen Punkte des R&M Plans bearbeitet und dokumentiert werden. Damit setzt Ford eine enge Zusammenarbeit zwischen den Unterlieferanten und den Maschinenherstellern voraus. Diese Zusammenarbeit muss zudem schriftlich festgelegt und der zuständigen R&M-Abteilung mitgeteilt werden.

4. Instandhaltung und Ersatzteile:

Instandhaltungsmaßnahmen und -intervalle müssen auf der Maschinen- bzw. Anlagenverfügbarkeit basieren. Die Notwendigkeit der Instandhaltungsmaßnahmen soll durch Felddaten be-

legt werden. Falls keine Felddaten zur Verfügung stehen, soll der Nachweis anhand von Konstruktionsunterlagen erfolgen. Die Entwicklung eines geeigneten Instandhaltungsplans basiert auf der Identifizierung von kritischen Komponenten und den Hauptfehlern, die bei der Datenanalyse und den FMEAs erkannt wurden. Um die Instandhaltungsmaßnahmen zu definieren, müssen folgende Unterlagen erstellt und an Ford übergeben werden:

- Die Instandhaltungsschritte sollen im Wartungshandbuch festgelegt werden
- Die Instandhaltungsmaßnahmen sollen auf:
 - Ausfallraten der Analyse des FRED-Modells basieren
 - Im Falle neuer Technologien müssen Verschleiß- und Belastungsberechnungen erstellt werden
- FMEA, die die Fehler der Instand zu haltenden Komponenten beurteilt

Falls die Maschine während eines Instandhaltungsvorgangs nicht betrieben werden kann, muss dies ebenfalls angegeben werden, da damit die Gesamtverfügbarkeit und auch die Lebenszykluskosten der Anlage beeinflusst werden.

Die Planung der Ersatzteilkosten soll ebenfalls auf statistischen Fehlerdatenauswertungen in Verbindung mit Lieferzeit, Garantie und Kosteninformationen basieren. Schon während der Entwicklungsphase soll ein Ersatzteil- und Logistik-Konzept in Zusammenarbeit mit dem Hersteller erarbeitet werden, das zunächst alle empfohlenen Ersatzteile enthält. Dieses Konzept wird daraufhin von Ford weiterentwickelt. Es wird festgelegt, welche der Teile gekauft und gelagert werden müssen, welche Teile von lokalen Bezugsquellen schnell bezogen werden können und welche Teile als Garantieteile vor Ort oder bei dem Hersteller gelagert werden müssen. Das Ziel ist die Erstellung eines Konzepts, das eine maximale Maschinenverfügbarkeit garantiert und gleichzeitig die Kosten der Ersatzteilkosten minimiert.

5. Life Cycle Cost (LCC):

Ford definiert die Lebenszykluskosten als die gesamten Kosten der Anschaffung, Installation, Betrieb und Instandhaltung während der gesamten Nutzungsdauer einer Anlage. Faktoren für Inflationsrate und Verzinsung können darüber hinaus berücksichtigt werden. Abbildung 4-9 stellt die Zusammensetzung der einzelnen Kostenblöcke dar. Die Instandhaltungskosten werden in *geplante* und *ungeplante Instandhaltung* unterteilt. Die geplanten Instandhaltungskosten bestehen aus den Material- und Lohnkosten der vorbeugenden Instandhaltung während der Nutzungsdauer einer Anlage. Ungeplante Instandhaltungskosten sind die Material- und Lohnkosten der Krisen-Instandhaltung für ungeplante Stillstände. Diese werden zudem weiter in Kleinstörungen, die durch das Bedienpersonal behoben werden können, und in Störungen, die nur das Instandhaltungspersonal beheben kann, unterschieden. Das Modell von Ford ist ein reines Kundenmodell.

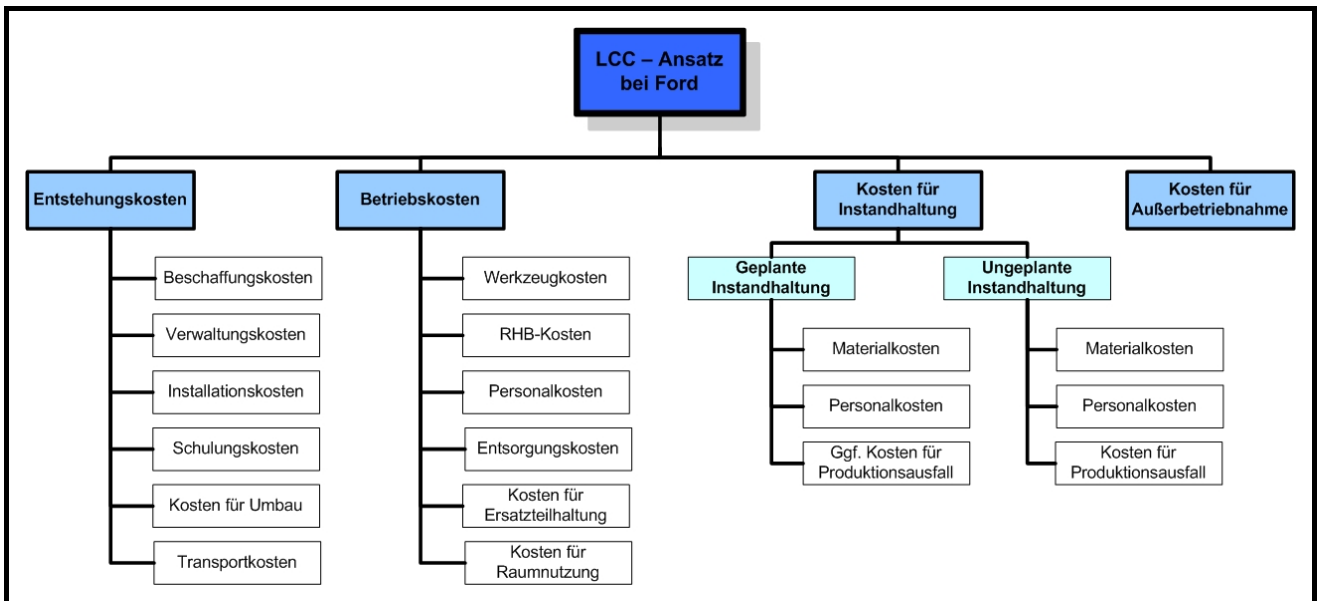


Abb. 4-9: LCC-Ansatz bei Ford

Das Lebenszykluskostenmodell dient zum einen als ein Planungswerkzeug und zum anderen als Dokumentation für den gesamten R&M Prozess. Das Hauptziel des LCC-Modells ist, den Konstruktionsprozess zu lenken, indem der Einfluss von Konstruktionsentscheidungen auf die Lebenszykluskosten aufgezeigt wird. Auf Basis der Lebenszykluskosten erfolgen die Auswahl der Lieferanten und die Vergabe des Auftrags.

In dem Life Cycle Cost Modell von Ford werden in Form eines MS Excel Formulars die zentralen Aspekte der Zuverlässigkeitsbetrachtung, der Instandhaltung, der Ersatzteilhaltung und der resultierenden Kosten dargestellt. Der Aufbau des LCC-Modells gliedert sich in folgende Bereiche:

1) „Ford Input Page“:

Angaben von Ford zu der geplanten Betriebsdauer und Produktionszeit, der Stückzahl, den Personalkosten, den Kosten für Verbrauchsstoffe sowie zu den Entsorgungskosten.

2) „Supplier Input Page“:

Angaben des Zulieferers zu den Anschaffungs-, Verwaltungs-, Liefer- und Schulungskosten sowie den Garantiekosten für einen Zeitraum von 10 Jahren. Darüber hinaus erfolgen Angaben zum Platzbedarf, der Anzahl an Maschinen, um geforderte Produktionsrate einzuhalten, der Anzahl an benötigtem Bedienpersonal und den benötigten Mengen an Verbrauchsstoffen. Außerdem müssen die berechneten Kennzahlen wie MTBF, MTBE und MTTR für die gesamte Maschine angegeben werden.

3) „Spare (Controls and Mechanical)“:

Auflistung der Ersatzteile unterteilt nach Elektrik und Mechanik. Es muss die Bestellnummer, der Hersteller, die Bezeichnung, der Einzelpreis, die Lieferzeit, die Anzahl, die Verteilungsparameter der Ausfallraten und die zum Kauf empfohlene Stückzahl angegeben werden. Darüber hinaus wird die Austauschhäufigkeit von Ersatzteilen und deren Kosten für einen Zeitraum von 10 Jahren kalkuliert. Falls die Verteilungs-

parameter der Ausfallraten einzelner Ersatzteile unbekannt sind, müssen Annahmen über die Art der Verteilung und die Lebensdauer getroffen werden.

4) „Preventive Maintenance“:

Aufstellung der erforderlichen Maßnahmen der geplanten Instandhaltung. Bezeichnung der Anlage, Häufigkeit, Dauer, benötigtes Personal, Beschreibung des Wartungsablaufs und des benötigten Materials mit Preis. Hier muss außerdem definiert werden, ob die Maschine während der Wartung weiter betrieben werden kann oder nicht.

5) „Tooling“:

Angaben zu Werkzeugart, Anschaffungskosten, Anzahl und Kosten pro Nachschliff und Jahr.

6) „LCC Analysis“:

Übersicht über die gesamten LCC- und Zuverlässigkeitskennzahlen für den Betrachtungszeitraum, wie MTBF, MTTR, Verfügbarkeit, gesamte Lebenszykluskosten, Anschaffungskosten, Instandhaltungskosten, die sich aus den vorherigen Angaben automatisch berechnen sowie eine Auflistung der Top 10-Fehler, die durch den Hersteller erfolgt.

7) „Detailed LCC“:

Automatische Ergebnisübersicht über die detaillierten Entstehungskosten, Betriebskosten, Wartungskosten, Ersatzteilkosten und Entsorgungskosten.

8) „BOM“ (Bill of Material)

Stückliste der gesamten Maschine (allerdings sehr umfangreich und wird i.d.R. nicht zwingend verlangt).

Eine Unschärfe des Modells stellt die Tatsache dar, dass alle benötigten Ersatzteile für Wartungsumfänge auch in der gesamten Ersatzteilliste angegeben werden müssen und somit in die abschließende LCC-Kalkulation doppelt einfließen. Diese Forderung verzerrt in gewisser Weise die Gesamtbetrachtung.

Controlling:

Alle Lieferanten müssen an einer R&M-Programmüberprüfung teilnehmen, die als Audit für die Einhaltung des Kaufvertrages und der R&M-Spezifikation dient und sechs Monate nach Produktionsanlauf stattfindet. Diese Prüfung beinhaltet Rückmeldungen des Herstellers, des Ford Produktions- und Instandhaltungspersonals und von den Technischen Mitarbeitern in Bezug auf detaillierte Projektbeschreibung, Beschreibung neuer verwendeter Technologien, vertragliche Anforderungen und deren Erfüllung, Erfüllung des R&M-Plans, entdeckte Fehler und Verbesserungsmaßnahmen, Status der Instandhaltungspläne sowie Prüfung der Ersatzteilhaltung und der Darstellung eines kontinuierlichen Verbesserungsplanes. Darüber hinaus erfolgt eine laufende Überwachung der Maschinenleistung anhand von Betriebsdaten. Sobald ein Zulieferer den R&M-Anforderungen nicht mehr entspricht, wird ihm eine Frist von 45 Werktagen gesetzt, um die Forderungen wieder voll zu erfüllen. Falls er es nicht schafft, wird ihm der „Grüne Status“ entzogen, und er scheidet aus dem Kreis der Lieferanten aus. Hersteller, denen der Grüne

Status entzogen wurde, können erst nach sechs Monaten eine erneute Zertifizierung beantragen. Daraufhin wird deren R&M-Programm entsprechend den Anforderungen erneut geprüft und bei Erfüllung der „Grüne Status“ wieder hergestellt.

Eine weitere Strafe kann z.B. der Abnahmestopp für neu gelieferte Maschinen sein, dies führt zu erheblichen monetären Verlusten auf Seiten des Herstellers. Im Konzept von Ford sind jedoch keine definierten Regelungen für den Fall einer Nichteinhaltung bzw. Abweichung festgelegter Kennwerte enthalten.

4.1.6 MAN (Konzeptidee)

Das vorgestellte Konzept der MAN AG basiert lediglich auf Überlegungen und ist kein angewandtes System. Das Konzept der Lebenszykluskostenrechnung der MAN entspricht einem Phasenmodell, das sich wie folgt darstellen lässt.

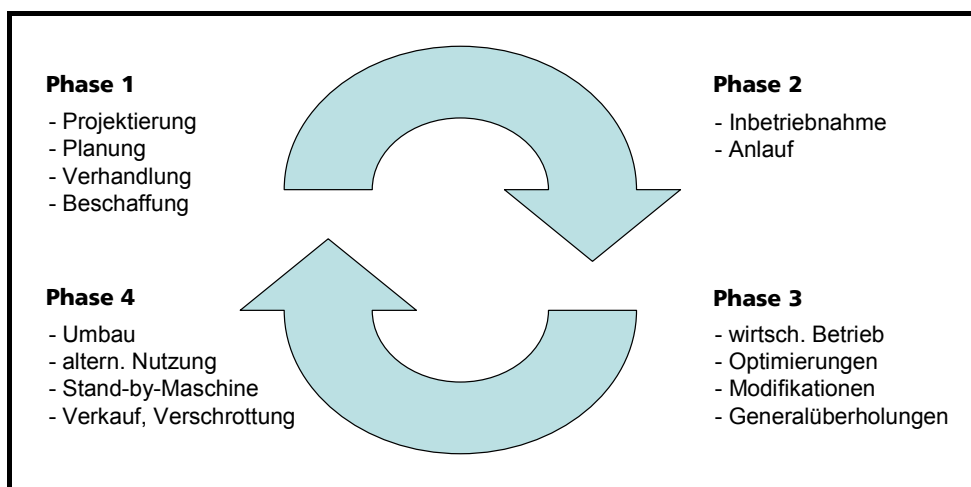


Abb. 4-10: Phasenmodell MAN

Die Kalkulation der Lebenszykluskosten basiert auf der Nutzung eines einheitlichen Kostenrechnungstools, das die vollständige Kostenbilanz über den Lebenszyklus einer Maschine abzubilden versucht. Die größten Schwierigkeiten liegen dabei laut MAN in der geringen Datensicherheit, da man auf Erfahrungswerte aus der Vergangenheit zurückgreifen muss. Um die richtige Investitionsentscheidung (**Phase 1**) zu treffen, soll ein Produktionsverantwortlicher für die ökonomisch und technisch sinnvollste Entscheidung verantwortlich sein, der Aspekte wie Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Flexibilität (Maschinenkennzahlen) auf der einen Seite und die Erzielung möglichst geringer Lebenszykluskosten (Beschaffungs-, Betriebs-, Ausfallkosten) auf der anderen Seite in seine Entscheidung einfließen lässt. Außerdem soll darauf geachtet werden, dass die Maschinenkonstruktion Eigenschaften wie „solide“, „verlässlich“ und „einfach“ genügt, um die Lebenszykluskosten nachhaltig zu reduzieren (kommt insbesondere, bei einer späteren unkomplizierten Instandsetzung, Umrüstung und Generalüberholung positiv zu tragen).

Besonders im Anlaufmanagement (**Phase 2**) sind einige Voraussetzungen zu leisten, um die Lebenszykluskosten zu verringern. Folgende Erfolgsfaktoren werden in diesem Zusammenhang genannt:

- erfahrener Projektleiter
- Zusammensetzung des Projektteams
- Aufgabenklärung der Teammitglieder

- richtiges Lastenheft mit den nötigen Maschinenanforderungen
- gute Terminierung des Projekts
- vorausschauende Vorbereitung der Integration (Schulung, Programmierung etc.)

In der Betriebsphase (**Phase 3**) stellt MAN einige Potentiale vor, die sich direkt auf die Verminderung der Lebenszykluskosten auswirken. Dazu gehören folgende „Stellhebel“:

- Verfügbarkeit erhöhen – Maschinenausfälle vermeiden
- Wartungsintervalle verlängern
- Verringerung der Verschleißteile
- Lebensdauer von Verschleißteilen verlängern
- Haltbarkeit von Komponenten verlängern

Dazu nennt MAN Strategien, wie die Lebenszykluskosten aus Betreibersicht gesenkt werden können.

Wartungs- und Instandhaltungsstrategie

- Entscheidung: Fremd- oder Eigenverantwortung
- präventive oder prädikative Instandhaltung

Bevorratungsstrategie von Verschleißteilen und Komponenten

- Logistikkonzept in Abstimmung mit dem Hersteller

Verfügbarkeit erhöhen durch Verantwortung des Bedieners

- Identifikation mit der Anlage erhöhen
- Anreize schaffen: Prämienlohn statt Akkord
- Fehlerdiagnose des Bedieners besser nutzen

Um die Kalkulation der Lebenszykluskosten mit der größtmöglichen Sicherheit durchführen zu können, existiert seitens MAN die Absicht, folgende **Zusagen seitens der Hersteller** vertraglich einzufordern:

- Verfügbarkeit (es wird nicht näher spezifiziert, auf welcher Ebene der Anlage)
- Wartungsarbeiten und -fristen mit Zeit- und Kostenabschätzung
- Verschleißteile
 - Benennung der Teile
 - Häufigkeit des Wechsels
 - Kosten für Ersatzteil
 - Zeitaufwand für Wechsel
- Haltbarkeit von Komponenten

Um ein effizientes LCC-Konzept implementieren zu können, ist es notwendig, dass sowohl auf Hersteller-, als auch auf Betreiberseite Voraussetzungen geschaffen werden. MAN nennt folgende **Voraussetzungen auf Herstellerseite**:

- Ermittlung von Felddaten der im Betrieb befindlichen Maschinen
- strukturierte Ermittlung von Ausfallursachen
- Schadensanalysen an Komponenten
- Ermittlung von Arbeitswerten für Instandsetzungsarbeiten
- Datenanbindung zur Fernüberwachung und Ferndiagnose in Zusammenarbeit mit den Betreibern
- Erarbeitung eines Geschäftsmodells

Folgende **Voraussetzungen** werden **auf Betreiberseite** genannt:

- durchgängig strukturierte Erfassung von Maschinendaten, Wartungsarbeiten und Wartungskosten
- Abläufe, Organisation und EDV-Systeme sollen entsprechend geändert werden (herstellerspezifische Anpassung)
- Eingriffe in die Wartungs- und Instandhaltungshoheit werden akzeptiert.
- Ermöglichung einer Datenanbindung für Fernüberwachung, bzw. Diagnose

4.1.6.1 Kooperationsform der LZK-Betrachtung

Aus Sicht der MAN ist es entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung eines LZK-Konzepts, dass sowohl Hersteller, als auch Betreiber einen Nutzen aus den gemeinsamen Vereinbarungen ziehen können. Daher sieht sich die MAN als Betreiber auch in der Pflicht, die durch den Hersteller zugesagten Daten über die Verfügbarkeit, Wartungsarbeiten, Verschleißteile und Haltbarkeit der Maschinenteile durch einen adäquaten Datenrückfluss über die tatsächlichen Kosten zu honorieren. Auch werden an den Hersteller bei Übererfüllung der geforderten Anlagenperformance monetäre Gegenleistungen gezahlt – analog zur Kostenbeteiligung des Herstellers bei Untererfüllung.

Folgende Voraussetzungen sind nach Ansicht der MAN für eine erfolgreiche Kooperation unerlässlich:

- gegenseitiges Vertrauen
- Transparenz
- Datenrückmeldung
- beidseitige WIN-WIN-Situation
- Bonus/Malus-System

Daher ergeben sich aus einer LZK-Kooperation sowohl für den Betreiber als auch für den Hersteller folgende *Nutzenaspekte*:

für den Betreiber

- Planungssicherheit
- verlässliche Kostenvorhersage
- Risikominimierung

für den Hersteller

- Differenzierungsmöglichkeit in der Angebotsphase

- Neues Geschäftsfeld für den Anbieter
- langfristige Kunden-Lieferantenbeziehung

4.1.7 Zusammenfassung

Zunehmend mehr Unternehmen konzipieren und implementieren LCC-Konzepte in unterschiedlichsten Formen. Das gemeinsame Ziel der meisten Ansätze ist es, bereits in der Beschaffungsphase die über den Lebenszyklus günstigste Maschine zu identifizieren und im Anschluss die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Maschinen noch zu steigern. Die Ursprünge von Life-Cycle-Costing gehen auf die 1960er Jahre zurück, in denen das Militär in den USA begann militärische Produkte und Verfügbarkeitsgesichtspunkten zu kaufen. Seit den 1990er Jahren hat sich Life-Cycle-Costing auch im zivilen Bereich etabliert und breitet sich weiter aus. Abbildung 4-11 zeigt eine Übersicht über die aktuell bedeutendsten Konzepte.

	Ford	Daimler Chrysler	FIAT	VW
Laufzeit	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	Keine Angabe
Gegenstand der Vereinbarung	- MTBF* - MTTR* - MTBE* - Ersatzteile - Wartungsdaten <i>der gesamten Maschine</i> - FMEA* - Ausfalldatenanalyse - RHB-Kosten*	- MTBF - MTTR - MCRP* - Ersatzteile - Wartungsdaten <i>ausgewählter Kostentreiber</i>	- MTBF - MTTR - Ersatzteile <i>der gesamten Maschine</i> - FMECA*	- Instandhaltungskosten - RHB-Kosten
Controlling	Ständige Überwachung über Betriebsdatenerfassung	½ - jährlich oder im Schadensfall	Einmaliges Treffen zwischen Fiat und Hersteller	Keine Angabe
Maßnahmen bei Nichterhaltung	Frist zur Fehlerbehebung, dann Ausschluss als Zulieferer	Kostenaufteilungsmodell im Fall von Forderungen	Konstruktive Änderungen bis Vorgaben erreicht werden	Keine Angabe
Besonderheiten	Langfristige Bindung von Zulieferern erwünscht	Kostencontrolling über die Vertragslaufzeit	3 Jahre Garantie, FMECA ist Hauptmerkmal	Noch im Aufbau

* **MTBF**: Mean Time between Failure; **MTTR**: Mean Time to Repair; **MTBE**: Mean Time between Events;
FME(C)A: Failure Mode and Effect (Criticality) Analysis; **MCRP**: Mean Cost of Replacement Parts; **RHB**: Roh-, Hilfs- & Betriebsstoffe

Abb. 4-11: Relevante LCC Konzepte (vgl. Fle-06b)

4.2 Strukturierung der Lebenszykluskosten (AP2)

Das vorliegende Arbeitspaket unterteilt sich in 2 wesentliche Arbeitsschritte. Zur Strukturierung der Lebenszykluskostenelemente wurden zunächst die bestehenden Normen und Richtlinien auf ihre Stärken und Schwächen hin untersucht. Aus der Literatur und vorhandenen Standardisierung erfolgte im Anschluss die Auswahl denkbarer LCC Elemente, die dann mit Hilfe einer anonymen Unternehmensbefragung (22 Unternehmen) bewertet wurden (vgl. Kap. 4.2.2).

4.2.1 Theoretische Identifikation der LCC Elemente

4.2.1.1 VDI-Richtlinie 2884 [VDI-03]

Inhalt

Die Richtlinie VDI 2884 hilft, bei der Anschaffung von Produktionsmitteln auf Basis der gesamten Lebenszykluskosten Kaufentscheidungen zu treffen. Die Richtlinie bietet auch eine Entscheidungsgrundlage, ob eine Lebenszykluskostenrechnung für den jeweiligen Anwender überhaupt sinnvoll ist. Zudem unterstützt sie das Festlegen der Instandhaltungsstrategie, die Bestimmung der geplanten Nutzungsdauer sowie die Entscheidung über die einzubeziehenden Kosten bis hin zur Bewertung von Alternativen.

Tabellen ermöglichen dem Anwender, Kosten und Erlöse systematisch zu erheben. In Verbindung mit der Richtlinie VDI 2885 *Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten - Daten und Datenermittlung* können instandhaltungsrelevante Einsatzbedingungen der Produktionsmittel sowie Instandhaltungsaufwendungen im Dialog zwischen Betreiber und Hersteller präzisiert werden.

Entstanden ist die Richtlinie als Reaktion darauf, dass immer mehr Betreiber von Produktionsanlagen Lebenszykluskostenbetrachtungen in ihren Auswahlprozess integrierten. Um die wirtschaftlich sinnvollste Alternative auszuwählen, werden von den Herstellern der Betriebsmittel Informationen eingefordert, welche die Lebenszykluskostenkalkulation auf Betreiberseite ermöglichen. Zudem soll das Konzept der Lebenszykluskostenrechnung auch dem Hersteller von Produktionsmitteln nutzen, um innovative Lösungen zu entwickeln und sie zu kommunizieren. Die Lebenszykluskostenermittlung kann also sowohl aus Sicht des Herstellers, als auch aus Sicht des Betreibers erfolgen und für beide Seiten sinnvoll sein. Um die Synergieeffekte eines gemeinsamen Lebenszykluskostenkonzepts auszuschöpfen, ist es daher entscheidend, dass eine einheitliche Methodik entwickelt wird, die für beide Vertragspartner Vorteile bringt und den jeweiligen Anforderungen gerecht wird.

Im Zusammenhang mit der Abgrenzung des Begriffs „Life Cycle Costing“ werden vier Themengebiete vorgestellt, die für die Implementierung der Lebenszykluskostenrechnung von Bedeutung sind:

1. Prognose – Folgewirkungen einer Investition sind zu prognostizieren
2. Abbildung – entscheidungsrelevante Faktoren müssen abzubilden sein
3. Erklärung – Kosten und Erlöse nicht nur erkennen, sondern auch erklären können
4. Gestaltung – Potentiale zur Gestaltung von Kosten und Erlösen ausschöpfen

Weiter werden anhand des Lebenszyklus von Produktionsmitteln („vor der Nutzung“, „während der Nutzung“ und „nach der Nutzung“) Kostenursachen genannt, die je nach anwendendem Unternehmen angepasst werden müssen. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Auswahl der zu betrachtenden Kostenelemente die strikte Relevanz von Bedeutung ist, d.h., dass ein relevantes Kostenelement eine signifikante Auswirkung auf die Lebenszykluskosten haben sollte.

Zielsetzung

Da die Richtlinie hauptsächlich aus Sicht der Betreiber formuliert ist, liegt die Zielsetzung darin, den Betreiber bei der Auswahl alternativer Produktionsmittel zu unterstützen. Beschaffungsentscheidungen sollen demnach aufgrund der aus der Investition resultierenden Gesamtlebenszykl-

luskosten getroffen werden. Für den Hersteller dagegen bedeutet die VDI-Richtlinie 2884 ein methodisches Vorgehen, „um innovative Konfigurationen des Produktionsmittels vor dem Hintergrund einer Lebenszykluskostenbetrachtung zu entwickeln“. Gemeinsame Modelle und Methoden zur Lebenszykluskostenermittlung würden aufgrund der Vergleichbarkeit und standardisierter Abläufe zusätzliches Einsparpotential bedeuten. Ziel der VDI-Richtlinie 2884 ist es deshalb, sowohl dem Betreiber, als auch dem Hersteller eine Methodik zur Verfügung zu stellen, welche die Alternativen nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ bewertet.

Stärken

Die VDI-Richtlinie 2884 nennt anhand der Lebensabschnitte potentielle Kostenelemente, die bei einer Lebenszyklusbetrachtung beachtet werden sollten. In der praktischen Anwendung erweist sich die Auflistung der Kostentreiber als sehr hilfreich.

Schwächen

Aufgrund der aggregierten Kostenbausteine ist es für den Anwender schwer, die Verfügbarkeitskennwerte der einzelnen Kostentreiber zu verifizieren. Ein Großteil des Prozesses zur Ermittlung der Lebenszykluskosten liegt darin, die Verfügbarkeiten der einzelnen Maschinenteile zu berechnen. Dieser Vorgang findet zweckmäßig auf der Baugruppenebene statt, da so ein Vergleich innerhalb ähnlicher Anlagen möglich ist. Die Baugruppe stellt sozusagen den größten gemeinsamen Nenner zwischen Maschinentypen dar, die in den Entscheidungsprozess einbezogen sind. Auch hat der Hersteller so die Möglichkeit, bereits berechnete Verfügbarkeitskennwerte aus anderen Angebotserstellungen zu übertragen, ohne die Kennzahlen neu berechnen zu müssen.

4.2.1.2 DIN EN 60300-3-3 [DIN-99]

Inhalt

Die DIN EN 60300-3-3 veranschaulicht allgemein das Konzept der Lebenszykluskostenrechnung, wobei der Fokus auf der Betrachtung von Kostenelementen liegt, die direkt die Zuverlässigkeit eines Produkts (oder technischen Systems) beeinflussen.

Zur allgemeinen Anwendung ist die Norm sowohl für Hersteller, als auch für die Nutzer der Produkte gedacht. Beschrieben wird der Sinn und Zweck der Lebenszykluskostenbetrachtung und die allgemeine Herangehensweise. Zur Erleichterung der Projekt- und Kostenplanung werden typische Kostenelemente der Lebenszykluskosten genannt. Weiter wird eine allgemeine Analyse der Lebenszykluskosten vorgestellt und mit Beispielen verdeutlicht.

Als Anwendungsbereiche des Lebenszykluskostenkonzepts werden Entscheidungsfindungen bzgl. Betriebs-, Instandhaltungs- und Entsorgungsstrategien genannt, die sowohl dem Produktnutzer als auch dem Hersteller helfen sollen, die gesamten Lebenszykluskosten zu verringern.

Zielsetzung

„Das primäre Ziel der Ermittlung der Lebenszykluskosten ist es, Eingabedaten für Entscheidungen in jeder oder in allen Phasen des Lebenszyklus eines Produkts zu liefern. Ein wichtiges Ziel bei der Erstellung von Lebenszykluskostenmodellen ist die Identifizierung von Kosten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben können oder von speziellem Interesse für die spezifische Anwendung sind“. Vorgestellt wird in diesem Zusammenhang das Vorgehen bei der Modellierung einer Lebenszykluskostenbetrachtung mit den jeweiligen Anforderungen,

die an eine realistische Abbildung der Realität geknüpft sind (Matrix-Darstellung der Kostenelemente – vgl. „Vorgehen“).

Vorgehen

Zur Schätzung der Lebenszykluskosten ist es notwendig, die gesamten Lebenszykluskosten in die Kostenelemente zu unterteilen, aus denen sie bestehen. Dafür ist entscheidend, dass die einzelnen Elemente genau identifiziert, definiert und geschätzt werden können. Man benötigt also eine sinnvolle Klassifizierung. Bei der entsprechenden Abgrenzung und Einteilung der Elemente sollten Zweck und Umfang der Lebenszykluskostenuntersuchung zugrunde gelegt werden. Um die Einteilung vorzunehmen, bedient sich die DIN EN 60300-3-3 einer Modellierung mittels Matrix-Darstellung mit den folgenden drei Dimensionen:

1. Kostenart
2. Lebenszyklusphase
3. Produktaufbruchstruktur

Jedes Kostenelement kann so anhand der Dimensionen systematisch erfasst und eindeutig bestimmt werden. Aus den Dimensionen kann die Wichtigkeit der exakten Festlegung der Lebenszyklusphasen abgeleitet werden, da nur bei einer genauen Definition der Phasen eine eindeutige Zuordnung der Kostenelemente möglich ist. Die relevanten Phasen sollten dabei so ausgewählt werden, dass sie den spezifischen Anforderungen der Lebenszykluskostenbetrachtung gerecht werden.

Ganz wesentlich ist demnach auch das Verständnis über die Wechselwirkungen zwischen den Aspekten der einzelnen Phasen (Leistung, Sicherheit, Instandhaltbarkeit, Flexibilität, Sicherheit usw.) und anderen Merkmalen des Produkts oder technischen Systems.

Die DIN EN 60300-3-3 stellt folgende sechs Hauptphasen im Lebenszyklus eines Produkts vor:

1. Konzept und Definition
2. Entwurf und Entwicklung
3. Herstellung
4. Einbau
5. Betrieb und Instandhaltung
6. Entsorgung

Die während der oben genannten Phasen auftretenden Gesamtkosten können allgemein unterteilt werden in Beschaffungskosten (1./2./3.), Besitzkosten (4./5.) und Entsorgungskosten (6.).

$$LZK = \text{Kosten}_{\text{Beschaffung}} + \text{Kosten}_{\text{Besitz}} + \text{Kosten}_{\text{Entsorgung}} \quad (4-5)$$

Dabei sind die Beschaffungskosten als gegeben und „allgemein sichtbar“ festgelegt und können teilweise die Einbaukosten enthalten.

Die Besitzkosten stellen einen großen Anteil an den gesamten LZK dar und unterliegen einer bestimmten Ungewissheit. Sie können sehr schnell die Beschaffungskosten übersteigen.

Die Entsorgungskosten spielen aufgrund gesetzlicher Bestimmungen bzgl. des Umweltschutzes eine immer wichtiger werdende Rolle. Je nach Branche (z.B. Atomkraftwerk) müssen beachtliche Rückstellungen für die Entsorgung eingeplant werden.

Stärken

Das Vorgehen in der Durchführung einer Lebenszykluskostenrechnung wird sehr detailliert beschrieben. Anschaulich sind auch die Beispiele im Anhang der Norm, anhand derer die theoretische Herangehensweise in der praktischen Anwendung verdeutlicht wird. Besonders Hilfreich ist die stichpunktartige Aufzählung relevanter Punkte, die bei der Planung und Umsetzung des Konzepts zu beachten sind. Neben der Lebenszykluskostenrechnung werden auch weitere Kostenrechnungen vorgestellt und erläutert, die die Methodik der Lebenszykluskosten im Einzelfall ergänzen können.

Die klare Strukturierung in der Einteilung der Kostenelemente (nach Kostenart, Lebenszyklusphase und Produktaufbruchstruktur) erleichtert dem Anwender, die für ihn relevanten Kostenelemente zu identifizieren und zu katalogisieren. Auch lässt sich dadurch die Abgrenzung gegenüber anderen, z. T. sehr ähnlichen Kostenelementen gut durchführen.

Schwächen

Die DIN EN 60300-3-3 gibt dem Anwender keine Hilfestellung, wann eine Lebenszykluskostenbetrachtung überhaupt sinnvoll ist. D.h. die Kosten der Ermittlung aller notwendigen Daten zur Lebenszykluskostenberechnung sollten geringer sein, als die Einsparungen durch die Erkenntnisse der Lebenszykluskostenrechnung. Es wird zwar darauf hingewiesen, dass Zweck und Sinn der Lebenszykluskostenbetrachtung an die jeweiligen Bedürfnisse anzupassen sind, aber es gibt – im Vergleich zur VDI-Richtlinie 2884 – keine Fragestellung, mit der sich der Anwender im Vorfeld auseinandersetzen kann, um die Entscheidung für oder gegen eine Berechnung der Lebenszykluskosten zu treffen. Auch werden explizit keine Kostenelemente als Anhaltspunkte genannt, lediglich – wie oben beschrieben – das methodische Vorgehen für ihre strukturierte Bestimmung.

4.2.1.3 MIL-STD-337 [Mil-89]

Inhalt

Der „Military Standard 337 Design to Cost“ ist anwendbar in Vertragswerken mit inhaltlichem Bezug zum Entwurf und der Entwicklung militärischer Systeme und Subsysteme, Zubehör und Software. Der originale Wortlaut beschreibt die Aspekte des Standards wohl am Besten:

„This document prescribes the Design to Cost program objectives and requirements for design and development of systems, subsystems, equipments, and software. It provides general and specific requirements to ensure effective control of the design-related production and ownership costs. This is accomplished by a Design to Cost program which is planned, documented, implemented, and reviewed in consonance with related technical and management disciplines. Included are requirements for making Life Cycle Cost elements inherent in the critical functional areas of reliability, logistics, and optimization by using trade-off studies, cost estimation and tracking in the life cycle management acquisition process; requirements for information sharing between government and industry of data and studies relative to the acquisition and ownership costs of the system; requirements for relating Design to Cost to the supportability considerations of the deployed system, to logistic support analyses, and to reliability and maintainability studies“.

Design to Cost - Programm

Unter „General Requirements“ des „Design to Cost“ – Programms werden Punkte genannt, die der Anwender bei der Nutzung des Programms zu beachten hat.

- a) Planung und Identifizierung der Kostentreiber (Elemente der „high risk areas“), Festlegen von Kostenzielen und Durchführen von Vergleichsstudien, um die kosteneffektivste Alternative zu bestimmen. Es sollte eine Liste der Kostentreiber angelegt werden, die ca. 80% der Kosten verursachen.
- b) Festlegen, in wieweit das Design to Cost – Programm im Verhältnis zur vorherrschenden Managementstruktur, vorhandenen Prozessen und bestehenden vertraglichen Vereinbarungen einführbar ist.
- c) Kontrolle der Zielkosten, Prozess-Dokumentation, Entwicklung von Aktionsplänen und Problemlösungskonzepten. Der Unternehmer hat in diesem Zusammenhang die Aufgabe, eine effektive, technisch orientierte Strategie zur Kostenkontrolle zu entwickeln, deren Fokus auf den Produktionskosten, den Betriebskosten und dem Support (technische Dienstleistung) liegen soll. Iterativ sollen die Ist- und Soll-Zustände des Design to Cost – Programms verglichen werden und wenn notwendig Maßnahmen (Aktionspläne) zur Zieleinhaltung getroffen werden.
- d) Integrierung einer Feedback-Möglichkeit im Design to Cost - Prozess, um die relevanten Lebenszykluskosten kontrollieren zu können.
- e) Verwendung existierender Datenquellen und Methoden zur Kostenanalyse und – wenn notwendig – Unterstützung bei der Entwicklung neuer Methoden.
- f) Überprüfung des Design to Cost – Status und aller Soll-Pläne des Design to Cost – Programms.
- g) Dokumentation der Grundregeln, Annahmen und Methoden, die in der Festlegung der Design to Cost – Ziele verwendet wurden.

Zu jedem Punkt werden in dem Standard Anmerkungen genannt, die an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. In Punkt 1.4 des MIL-STD-337 wird darauf hingewiesen, dass, obwohl das Vorgehen auf die meisten technischen Systeme anwendbar ist, die oben genannten Design to Cost – Aspekte an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden sollten und damit nur als Anhaltspunkte dienen, wie ein Vorgehen in der Kostenkalkulation ablaufen sollte.

Schwächen

Die Anleitung zum Design to Cost – Programm sind recht allgemein gehalten. So wird zur Bestimmung der Kostentreiber (relevante Kostenelemente) lediglich beschrieben, dass eine Liste anzufertigen ist, die die Kostenelemente beinhalten soll, die ca. 80% der Kosten verursachen. Ein systematisches Vorgehen oder eine entsprechende Methodik zur Erfassung der Kostenelemente wird nicht vorgestellt. Es wird lediglich eine Aufzählung von „high risk areas“ vorgestellt, die traditionell problembehaftet sind bei der Kostenbestimmung und -vorhersage. Auch fehlen im MIL-STD-377 konkrete Vorschläge bzgl. der Kostenelemente, wie sie z.B. in der VDI-Richtlinie 2884 oder dem VDMA-Einheitsblatt 34160 genannt werden.

4.2.1.4 VDMA-Einheitsblatt 34160 [VDM-06]

Inhalt

Da sich die Hersteller von Maschinen und Anlagen immer häufiger mit verschiedenen Anforderungen bezüglich Lebenszykluskosten seitens der Betreiber konfrontiert sehen, wurde das VDMA-Einheitsblatt in Zusammenarbeit mit Experten unterschiedlicher Fachverbände der VDMA ausgearbeitet. Dabei geht es um eine faire, einheitliche und verbindliche Berechnungsvorschrift für die Prognose von Lebenszykluskosten. „[...] allerdings werden dabei indirekte Kosten wie z. B. die der Eingliederung in bestehende Produktionsabläufe oder „weiche“ Effekte, die mit Motivation und der informellen Aneignung von Wissen zu tun haben, nicht berücksichtigt.

Als Leitfaden für Anwender beschreibt das Einheitsblatt die strukturierte Definition und Prognose der Lebenszykluskosten bei Maschinen, Anlagen und Komponenten (nachfolgend als „Maschinen“ zusammengefasst). Für den Anwender stellt das Einheitsblatt demnach ein Marketinginstrument dar, um Angebote mit ganzheitlicher Kostenbetrachtung zu kommunizieren. Dem Betreiber dient es als Basis für eine einheitliche, vergleichbare Ausschreibung von Investitionen. Das VDMA-Einheitsblatt birgt in sich demnach Vorteile für beide Vertragspartner.

Um eine sinnvolle Modellierung zu erreichen, wird unterstellt, dass die zu betrachtenden Maschinen in gewissen Parametern vergleichbar sind (Output, Qualität, Leistungsgrad etc.). Preisefekte wie Finanzierungen oder Kapitalkosten werden dabei nicht berücksichtigt.

Das Modell gliedert sich wie in folgender Abbildung dargestellt in die Phasen Entstehung, Betrieb und Verwertung.

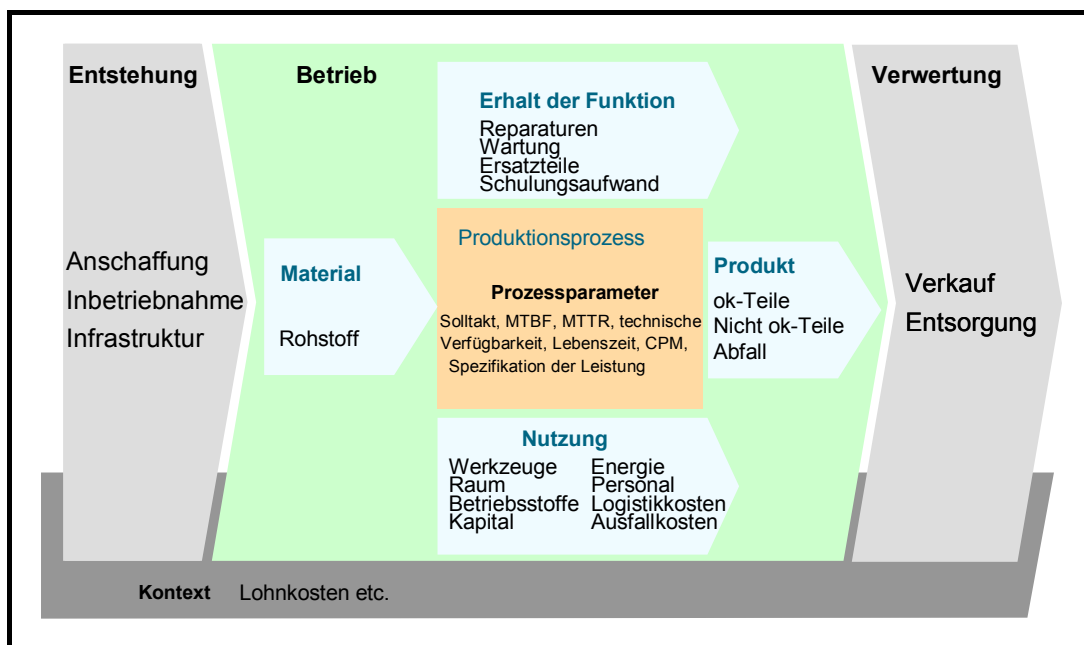


Abb. 4-12: Struktur des VDMA-Prognosemodells

Für jede Phase werden die dazugehörigen relevanten Kostenblöcke ermittelt und deren Berechnungsvorschrift festgelegt. Das Modell ist baumartig strukturiert und kann in seinen Bestandteilen systematisch erweitert und detailliert werden. Als Datenbasis werden dem Prognosemodell Grunddaten beigelegt, die einen Vergleich zwischen ähnlichen Maschinentypen ermöglichen sollen. Dazu gehören folgende Werte:

Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
Betrachtungszeitraum	Zeitraum der vom Kunden geplanten Nutzung	Eingabe	Jahre
Betriebsstunden der Maschine pro Jahr	Geplante Belegungszeit T nach VDI 3423	Eingabe	Stunden
Leistungsgrad	Anteil von Gutteilen an allen produzierten Produkten	Eingabe	%
Produktionsgeschwindigkeit	Durchschnittliche Anzahl von produzierten Anteilen pro Stunde.	Eingabe	Einheiten / Stunde
Vorgänge pro Jahr	Durchschnittliche Anzahl von Arbeitsvorgängen pro Jahr geplant (<i>Alternative zu D6</i>)	Eingabe	Anzahl
Stückzahl Soll pro Jahr	Durchschnittliche produzierte Produkte pro Jahr geplant (<i>Alternative zu D5</i>)	Eingabe	Anzahl
Verfügbarkeit der Maschine	Durchschnittliche Verfügbarkeit der Maschine für den Betrachtungszeitraum	Eingabe	%
Belastungsmix	Verteilung der Lastenarten, Volllast, Teillast oder Leerlauf der Maschine, z. B. „20% Volllast, 40% Teillast, 40% Leerlauf“.	Eingabe	Text mit Prozentanteilen

Nutzt der Betreiber das Prognosemodell zur Ausschreibung, so werden vom Hersteller diejenigen Grunddaten und Detaillierungsebenen gefordert, die der Betreiber als relevant erachtet. Aus der Sicht des Herstellers kann das Modell als Angebotsgrundlage genutzt werden, um die Performancedaten der Maschine näher zu beschreiben. Ebenso definiert er die Rahmenbedingungen und den Detaillierungsgrad des Modells unter dem er anbietet.

Zielsetzung

Ziel des VDMA-Einheitsblatts 34160 ist die einheitliche Erfassung der Lebenszykluskosten einer Maschine, um sowohl die Vergleichbarkeit für den späteren Betreiber zu ermöglichen, als auch die Angebotsdarstellung seitens der Hersteller zu standardisieren.

Stärken

Geschickte Abbildung der Kostenblöcke durch ein systematisches Herunterbrechen der Maschinenstruktur bis auf die gewünschte Detaillierungsebene. Das Prognosemodell bietet damit die Möglichkeit, die Kostenblöcke beliebig zu verfeinern. Außerdem existiert eine Liste an Vorschlägen für potentielle Kostenelemente, an der man sich bei der Durchführung einer Lebenszykluskostenbetrachtung orientieren kann. Ein angefügtes Beispiel am Ende des Einheitsblatts veranschaulicht exemplarisch das Vorgehen, das je nach Anwender spezifisch an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann.

Als weitere Stärke ist zu sehen, dass das Einheitsblatt die Möglichkeit bietet, die Kosten sowohl detailliert als auch als Pauschalbetrag in das Prognosemodell zu integrieren.

Schwächen

Das Modell berücksichtigt keine Finanzierungen, Kapitalkosten oder andere Preiseffekte, die die Lebenszykluskosten beeinflussen könnten.

4.2.1.5 Gegenüberstellung der Normen und Richtlinien

In der folgenden Abbildung werden die oben vorgestellten Ansätze noch einmal nach Stichpunkten gegeneinander abgegrenzt.

Standard Aspekte	VDI-Richtlinie 2884	DIN EN 60300-3-3	MIL-STD- 337	VDMA-Einheits- blatt 34160
Detaillierungsgrad	detailliert und spezifisch	sehr detailliert, allgemein gehalten	allgemein gehalten	detailliert und spezifisch
Umfang	umfangreich	sehr umfangreich und komplex	weniger umfangreich	umfangreich
Erfassung / Modellierung der Kostenelemente	über LZ-Abschnitte anhand von Vorschlägen	3-dim.Matrix: 1. Kostenart, 2. LZ-Phase, 3. Produktstruktur	keine Methodik, allgemeine Beschreibung	anhand von LZ-Phasen, Kostenabbildung durch Baumstruktur, Vorschläge
Perspektive der Formulierung	Betrachtung primär aus Betreibersicht	Betrachtung aus Hersteller- und Betreibersicht	Betrachtung aus Betreibersicht	Betrachtung aus Herstellersicht

Abb. 4-13: Gegenüberstellung der wesentlichen Lebenszykluskostenstandards

4.2.2 Auswahl und Strukturierung der LCC Elemente

Auf Basis der Literatur und Normung wurden gemäß Abbildung 4-14 die LCC Elemente für die im vorliegenden Kapitel beschriebene Befragung ausgewählt. Die als relevant eingeschätzten Elemente wurden schlussendlich für die weitere Betrachtung ausgewählt.

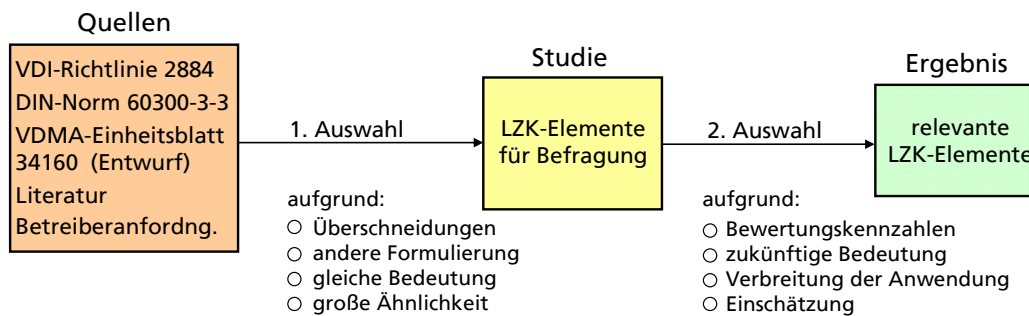


Abb. 4-14: Vorgehensweise zur Auswahl der relevanten LCC Elemente

Für die Einschätzung der Bedeutung der Einzelemente wurden den Befragten 4 Einschätzungsmöglichkeiten gegeben. Durch Mittelwertbildung über alle Antworten erhält man daraus das Maß der Bedeutung des jeweiligen LCC-Elements. Die Varianz gibt Aufschluss über den Konsens in der Meinungsbildung.

Gewichtung

Beispiel: Bedeutung von LCC-Element XY

Gewichtung	0,1	0,35	0,65	0,9
Unternehmen 1	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unternehmen 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Unternehmen 3	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

i	X _i
1	0,35
2	0,9
3	0,1
⋮	⋮
n	
Mittelwert \bar{X}	$\frac{\sum X_i}{n}$
Varianz S	$\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}$

Abb. 4-15: Bewertungsskala

4.2.2.1 Analyse der Lebenszykluskostenelemente**4.2.2.1.1 Entstehungs- / Installationsphase****Kosten für die Marktanalyse**

Dieses Element wird nur im Fragebogen für Betreiber aufgeführt und dient nicht als Kostenpunkt, der für beide Vertragsparteien Bedeutung hat. Auch ist die Einschätzung der Betreiber dem Kostenelement gegenüber eher unterdurchschnittlich. Daher werden die Kosten für die Marktanalyse nicht weiter betrachtet.

Kapitalkosten

Von großer Wichtigkeit sind die Kapitalkosten, denen von beiden Vertragspartnern ein hoher Einfluss auf die Lebenszykluskosten beigemessen wurde. Aus dem Selbstverständnis ihrer Bedeutung sind sie definitiv relevant.

Kosten für Umbaumaßnahmen

Analog zu den Kosten für die Marktanalyse wird dieses Element lediglich im Fragebogen für Betreiber aufgeführt und dient nicht als Kostenpunkt, der für beide Vertragsparteien relevant ist. Daher werden die Kosten für Umbaumaßnahmen nicht weiter betrachtet.

Erstausrüstung mit Ersatzteilen

Sowohl die Einschätzung seitens der Betreiber als auch der Hersteller liegen über der Mittelwert-Schwelle von 0,5. Dass der relativ hohe Wert der Varianz mit 0,065 von einer weniger einheitlichen Meinung zeugt, ändert nichts an der Relevanz dieses Kostenelements.

Garantieleistungen

Dieses Kostenelement zeigt beispielhaft die Eindeutigkeit in der Relevanz und in der Meinungsbildung. Der stark überdurchschnittliche Mittelwert von ca. 0,8 und die äußerst geringe Varianz von 0,006 untermauern die vor der Befragung vermutete Einschätzung. Aus der Natur der Sache heraus misst der Betreiber den Garantieleistungen seitens des Betreibers eine höhere Bedeutung zu als der Hersteller selbst, der dieses Verkaufsargument und die Chance zur Differenzierung gegenüber potentiellen Wettbewerbern weniger stark gewichtet.

Garantiekosten

Die Varianz der Bewertung für die Garantiekosten nimmt im Gegensatz zur Varianz der Garantieleistungen mit einem Wert von 0,07 das andere Extrem ein. Hieraus ist ersichtlich, dass in der Bewertung der Wichtigkeit große Meinungsverschiedenheiten auftraten, die z. T. aber auch von Verständnisschwierigkeiten der Definition herrühren können. Der Mittelwert als ausschlaggebendes Kriterium erreicht aber dennoch einen überdurchschnittlichen Wert und begründet damit die Relevanz der Garantiekosten für die weitere Betrachtung. Im Gegensatz zu den Garantieleistungen, misst der Hersteller den Garantiekosten eine höhere Bedeutung zu als der Betreiber.

Aufwendungen für Peripheriegeräte

Eines der Ergebnisse des zweiten Workshops der an dem Gesamtprojekt beteiligten Herstellerfirmen war, dass – obwohl der Mittelwert der Betreiberbewertung nicht die Schwelle von 0,5 erreicht hat – das Kostenelement für Peripheriegeräte trotzdem als relevant eingestuft wird. Grund dafür ist zum einen die relativ geringe Varianz von 0,03 und der viel höhere Mittelwert der Herstellerbewertung (0,61 im Vergleich zu 0,42 der Betreiber).

Transportkosten

Den mit Abstand geringsten Mittelwert aller Kostenelemente aus der Entstehungs- / Installationsphase wurde mit 0,32 den Transportkosten zugeordnet, die somit zukünftig nicht weiter betrachtet werden.

Installation

Ebenfalls mit einem überdurchschnittlichen Mittelwert und einer geringen Varianz zeichnet die Auswertung das Kostenelement Installation aus, das damit als relevant eingestuft wird.

Inbetriebnahme

Wohl aufgrund der hohen Anlaufkosten bei der Inbetriebnahme (Frühausfälle) wird diesem Kostenelement eine große Bedeutung beigemessen. Mit einem Mittelwert von über 0,6 und der Auswahl des Kostenelements wird dieser Tatsache Rechnung getragen.

Schulungskosten

Ebenfalls von Bedeutung für die Befragten waren die Schulungskosten in der Entstehungs- / Installationsphase. Mit 0,03 recht gering war die Varianz, was darauf schließen lässt, dass sich die Befragten in diesem Punkt relativ einig waren. Die Schulungskosten stellen deshalb einen relevanten Kostenpunkt dar.

Kosten für Netzinfrastruktur

Keine weitere Beachtung finden dagegen die Kosten für die Netzinfrastruktur, da zwar aus Betreibersicht der Mittelwert von 0,5 gerade erreicht wird, die Hersteller diesem Kostenpunkt aber eine eher untergeordnete Bedeutung beimessen.

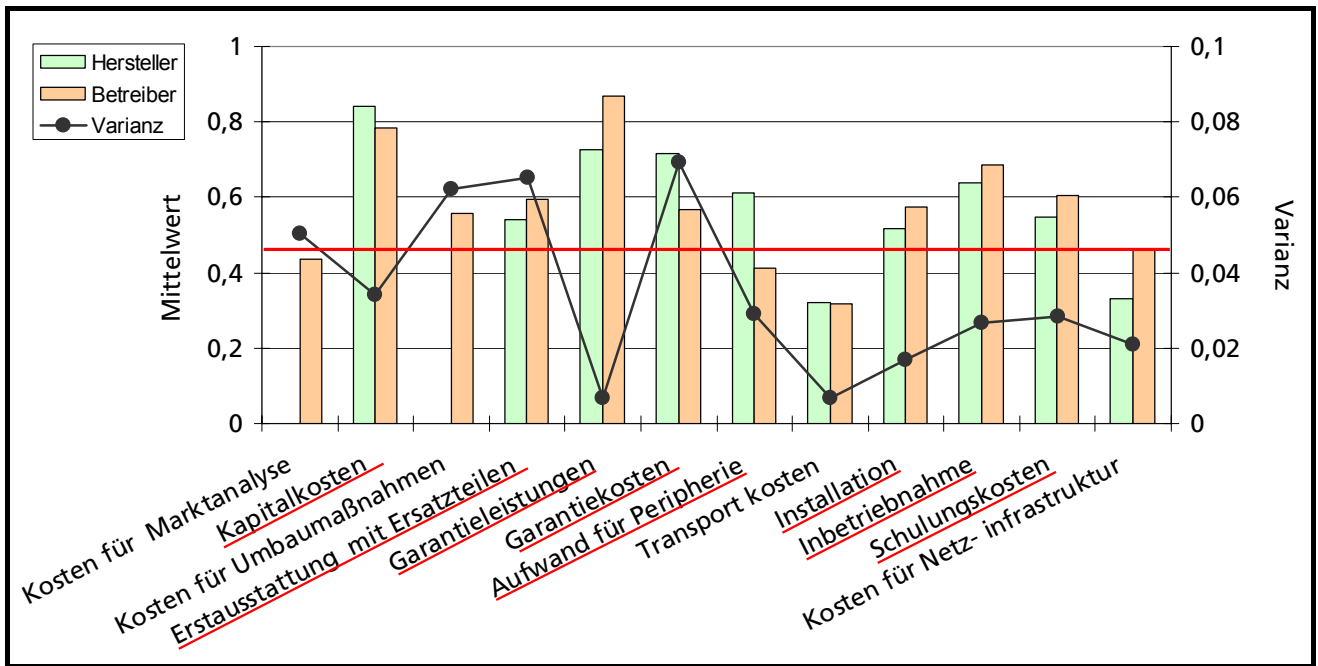


Abb. 4-16: Bedeutung der LCC-Elemente aus Entstehungs-/Installationsphase

4.2.2.1.2 Betriebsphase

Die Betriebsphase umfasst auch die Instandhaltung mit Wartung & Inspektion sowie geplanter und ungeplanter Instandsetzung. Aufgrund differenzierter Herangehensweise und unterschiedlicher Kostenelemente, sind diese Aspekte in Anlehnung an den Maschinenlebenszyklus weiter unten explizit aufgeführt.

Kosten für RHB-Stoffe (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe)

Neben der erreichten Mittelwertschwelle spielt bei der Auswahl dieses Kostenpunktes v. a. die zunehmende Bedeutung der Kosten für Schmierstoffe, Fette usw. eine Rolle (in besonderem Maße für den Betreiber, dessen Bewertung deutlich über der Bewertung der Hersteller liegt). Dieses Kostenelement wird daher in die weitere Betrachtung einbezogen.

Stromverbrauch je Maschine

Um den Energie-Aspekt abbilden zu können, wurde in der Erhebung die Bedeutung des Strom- und Wasserverbrauchs abgefragt. Der Mittelwert des Kostenpunkts Stromverbrauch lag deutlich über dem des Wasserverbrauchs, obwohl die Varianz weit größer ist als die der Bewertung für den Wasserverbrauch. Das lässt darauf schließen, dass die Teilnehmer sich darüber einig waren, dass die Wasserkosten eher geringe Bedeutung haben. Aus diesem Grund wurde von diesen Kostenelementen lediglich der Stromverbrauch je Maschine ausgewählt.

Wasserverbrauch je Maschine

Geringere Bedeutung als der Stromverbrauch. Dieser Kostenpunkt wird demnach nicht weiter betrachtet (siehe Stromverbrauch je Maschine).

betriebsbedingte Entsorgungskosten

Besonders die Entsorgung von Kühlschmierstoffen kann mit sehr hohen Kosten verbunden sein. Die Bewertung durch die Teilnehmer ist sehr ähnlich zu den Kosten für RHB-Stoffe, wobei die

Betreiber dem Kostenelement wiederum eine größere Bedeutung beimessen, da diese die Kosten direkt zu tragen haben. Der Hersteller dagegen nur indirekt, da er geringere Entsorgungskosten als Verkaufsargument nutzen kann.

Personalkosten für die Bedienung

Schon die Benennung dieses Kostenelements macht seine Relevanz offensichtlich, da die Personalkosten entscheidenden Einfluss auf Lebenszykluskosten haben. Wenn man über einen Zeitraum von zehn Jahren zwei verschiedene Maschinen vergleicht, die denselben Output produzieren und die eine davon einen Maschinenbediener erfordert, die andere dagegen zwei Bediener, wird der gravierende Kostenunterschied sehr deutlich. Mit einem Mittelwert von knapp 0,9 liegt die Betreiberbewertung auf dem höchsten Wert, der durch die Befragung entstand. Von Herstellerseite wurde dem Kostenelement ein weit geringerer Wert von 0,61 zugewiesen.

Werkzeugkosten im Betrieb

Ein ganz ähnliches Bewertungsverhalten lässt sich bei den Werkzeugkosten in der Betriebsphase erkennen. Die Differenz der Mittelwerte ist nicht ganz so groß wie beim vorhergehenden Kostenpunkt. Die Varianz ist mit 0,018 ebenfalls sehr gering. Da die Werkzeugkosten einen zentralen Punkt in der Lebenszykluskostenbetrachtung einnehmen, ist dieses Kostenelement für die weitere Betrachtung in jedem Fall relevant.

Lagerkosten für Ersatzteile

Obwohl der Mittelwert von 0,5 weder aus Betreiber-, noch aus Herstellersicht erreicht wird, ist das Kostenelement dennoch als relevant eingestuft.

Kapitalkosten für Ersatzteile

Der Mittelwert von 0,5 wird durch die Bewertung erreicht. Aus Herstellersicht liegt er mit 0,58 darüber, aus Betreibersicht marginal darunter. Bemerkenswert bei diesem Kostenelement ist die sehr hohe Varianz, die die uneinheitliche Entscheidungsfindung widerspiegelt. Sie ist noch etwas höher als die Varianz beim Kostenpunkt Stromverbrauch und den betriebsbedingten Entsorgungskosten. Entscheidend für die Auswahl dieses Kostenelements ist aber die Überlegung, dass die Betreiberfirma nach der Garantiezeit mit enormen Aufschlägen auf die Ersatzteilpreise zu rechnen hat. Bei einem zugrunde gelegten Betriebszeitraum von zehn Jahren sind daher acht Jahre mit einem hohen Kostenrisiko in der Beschaffung von Ersatzteilen verbunden.

Kosten für Umrüstung

Einig war man sich dagegen in der Bewertung der Bedeutung der Kosten für eine eventuelle Umrüstung in der Betriebsphase. Aufgrund immer kürzer werdender Baureihen-Zyklen (in der Automobilindustrie ca. 5-6 Jahre), wächst die Bedeutung dieses Kostenaspekts enorm, da innerhalb des zugrunde gelegten Maschinenlebenszyklus von ca. 10 Jahren mindestens einmal umgerüstet werden müsste.

Untenstehende Abbildung fasst die Ergebnisse der Bewertungen aus der Betriebsphase noch einmal zusammen.

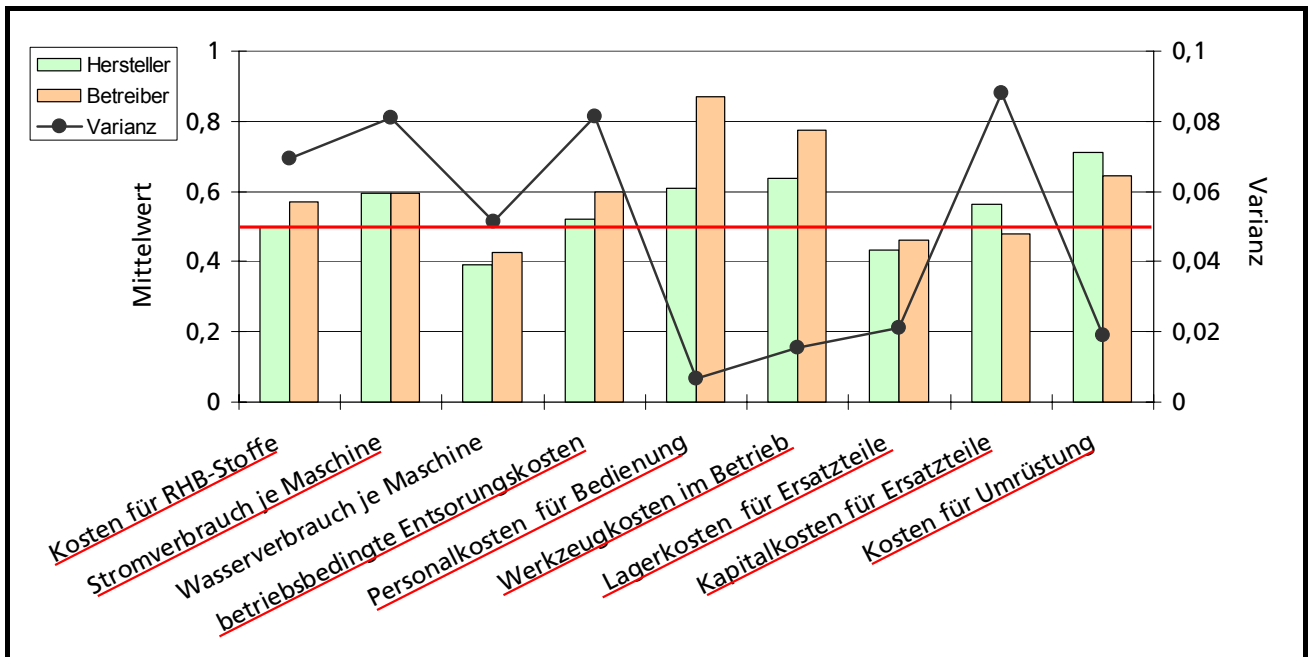


Abb. 4-17: Bedeutung der LCC-Elemente aus Betriebsphase

4.2.2.1.3 Instandhaltung (Wartung & Inspektion)

Die Kostenelemente, die durch regelmäßige Tätigkeiten an der Maschine zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes (Inspektion) und die Maßnahmen zur Bewahrung des Soll-Zustandes entstehen, werden in den nachfolgenden Punkten betrachtet.

Personalaufwand

Zwar war die Meinungsfindung nicht einheitlich (relativ hoher Wert der Varianz von 0,063), aber die hohe Bewertung des Mittelwerts – vor allem seitens der Hersteller – ist hinreichend für die Relevanz dieses Kostenelements.

Zeitaufwand

Mit 0,78 den exakt gleichen Mittelwert ordneten die befragten Seiten dem Kostenelement Zeitaufwand zu. Wie auch beim Reinigungsaspekt, ist dieser Kostenpunkt stark abhängig von der Zugänglichkeit der Maschine und beeinflusst direkt die Höhe der Lebenszykluskosten.

Materialaufwand

Ebenfalls das Mittelwertkriterium von 0,5 hat das Kostenelement Materialaufwand erreicht und ist somit relevant für die zukünftige Betrachtung.

Schulungsaufwand

Sehr einheitlich wurde in Bezug auf die Schulungskosten bewertet, die je nach Maschinentyp unterschiedlich hoch ausfallen. An diesem Beispiel können auch die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Kostenpositionen erklärt werden. Ein hoher Komplexitätsgrad der Maschine erfordert einen hohen Personaleinsatz bei der Wartung und Inspektion, was mit einem hohen Zeitaufwand gleichzusetzen ist. Proportional dazu verlaufen auch die Schulungskosten, die mit der Komplexität der Maschine ebenfalls ansteigen. Die Hürde von 0,5 wurde zwar nur knapp

erreicht, aber die Meinungsbildung war sehr einheitlich und daher ist dieses Kostenelement relevant für die zukünftige Betrachtung.

Prüf- und Messaufwand

Die Tätigkeiten in der Wartung und Inspektion sind geprägt durch das Prüfen und Messen der geforderten Toleranzen und Performanceparameter der Maschine. D.h. dass durch eine hohe Maschinenkomplexität ein hoher Aufwand beim Prüfen und Messen entsteht, was wiederum zur Folge hat, dass der Zeitaufwand dementsprechend ansteigt und die Personalkosten ebenfalls. Ist also ein Kostenelement einer solchen „Kostenkette“ relevant, bedingt das ebenfalls die Relevanz der übrigen Kostenelemente.

Aufwand für Reinigung

Kühlschmierstoffe sollten kühlen, schmieren und haben die Aufgabe des Abtransports von Spänen aus dem Bearbeitungsraum. Wenn trocken bearbeitet wird (ohne Kühlschmierstoff), müssen die Späne auf alternative Art und Weise – z.B. vom Fachpersonal – in einem regelmäßigen Turnus entfernt werden. Das kostet Personal, Zeit, Schulungsintensität und damit Geld. Obwohl die geforderten Kennzahlenwerte in diesem Punkt nicht erreicht werden, ist aufgrund der vorgestellten Überlegung der Reinigungsaufwand für die Betrachtung der Lebenszykluskosten relevant.

Aufwand für Generalüberholung

Ähnlich zum Aufwand für eine Umrüstung, verhält es sich mit dem Aufwand für eine Generalüberholung. Entscheidend für die Kosten ist die Komplexität und der Aufbau (geschraubt, geklebt, Baukastenform?) der Maschine. Besonders für den Betreiber stellt sich dieser Punkt als bedeutend dar (Mittelwert von 0,71) und wird als relevant betrachtet.

Abbildung 4-18 verdeutlicht die Ergebnisse der Bewertungen aus Wartung und Inspektion noch einmal grafisch.

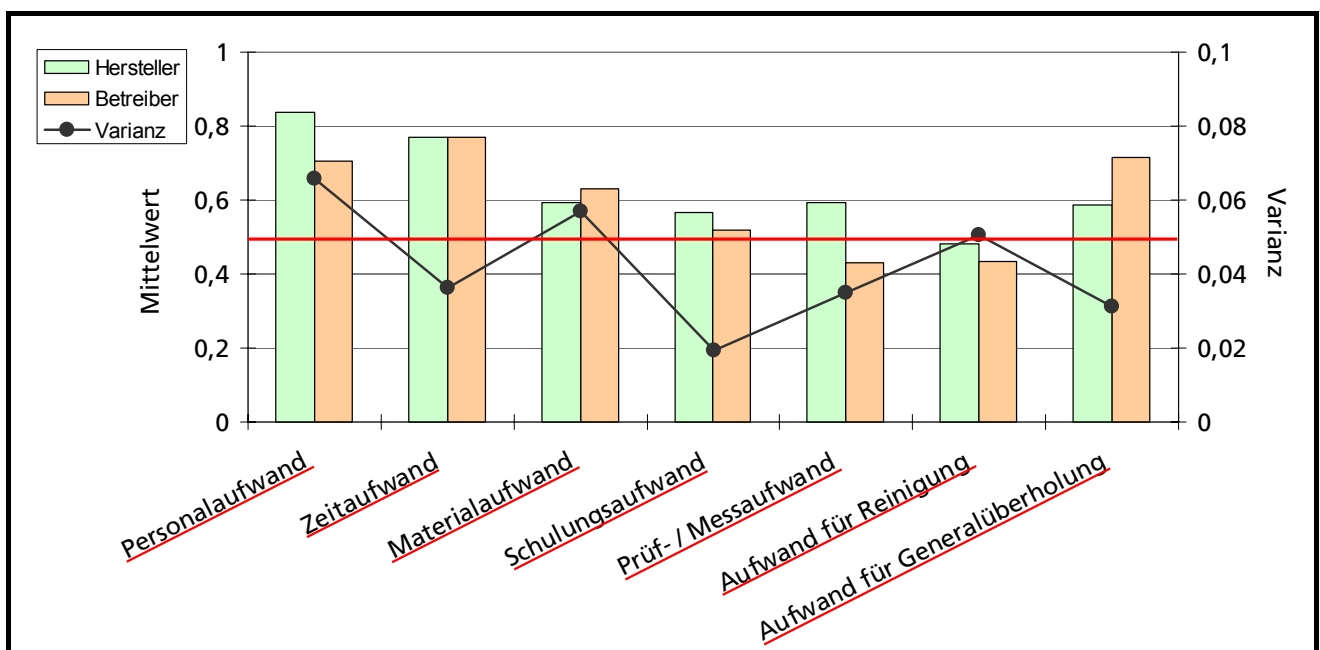


Abb. 4-18: Bedeutung der LCC-Elemente aus Instandhaltung (Wartung & Inspektion)

4.2.2.1.4 Instandsetzung (geplant)

Die Instandsetzung als Bestandteil der Betriebsphase gliedert sich in Anlehnung an den Maschinenlebenszyklus in geplante und ungeplante Instandsetzung. Dabei geht es nach DIN 31051 um die „Wiederherstellung des Sollzustandes von technischen Mitteln eines Systems“.

Personalaufwand

Analog zur Instandhaltung zu sehen. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kostenelementen sind in der Instandsetzung ebenfalls vorhanden. Der Personalaufwand ist daher – nicht nur aufgrund des hohen Mittelwerts von 0,75 – als sehr relevant einzustufen.

Zeitaufwand

Siehe Instandhaltung

Materialaufwand

Siehe Instandhaltung

Schulungsaufwand

Siehe Instandhaltung. Interessant ist, dass die Varianz beim Schulungsaufwand einen so deutlich geringeren Wert einnimmt als bei den übrigen Kostenelementen der geplanten Instandsetzung. Die Verläufe sind denen in der Wartung und Inspektion sehr ähnlich. Schulungskosten werden also einheitlich als sehr wichtig erachtet. Zwar bekamen der Personalaufwand, der Zeitaufwand und der Materialaufwand höhere Bewertungen beim Mittelwert, aber der Konsens in der Meinungsbildung ist beim Schulungsaufwand mit unter am größten.

Werkzeugkosten für Reparatur

Als nicht relevant werden die Werkzeugkosten für die Reparatur erachtet. Zwar ist diese Meinung durch die überdurchschnittlich hohe Varianz eher uneinheitlich, aber der geringe Mittelwert von 0,4 führt zum Ausschluss dieses Kostenelements.

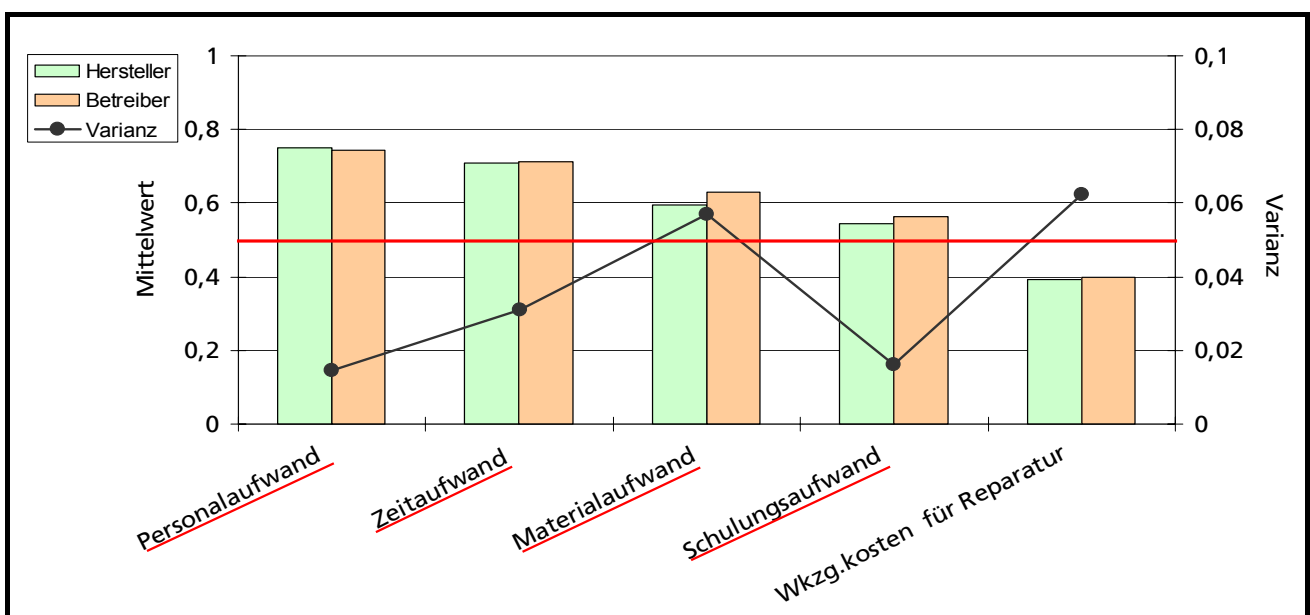


Abb. 4-19: Bedeutung der LCC-Elemente aus Instandsetzung (geplant)

4.2.2.1.5 Instandsetzung (ungeplant)

Mean Time Between Failure (MTBF)

Ein sehr gutes Beispiel für die eindeutige Relevanz ist dieses Kostenelement. Sowohl der überaus hohe Mittelwert von 0,83, als auch die sehr geringe Varianz von 0,007 fundieren die hohe Bedeutung des MTBF, der als klassische Kennzahl für die Verfügbarkeit eines technischen Systems sehr etabliert und anerkannt ist.

Mean Time To Repair (MTTR)

Analog zum MTBF stellt sich auch durch die Bewertung des MTTR die klare Relevanz heraus, die keiner weiteren Kommentierung bedarf.

Personalaufwand

Ab dem Personalaufwand findet im unten eingefügten Schaubild eine Annäherung sowohl des Mittelwerts, als auch der Varianz hin zu einem durchschnittlichen Wert statt.

Materialaufwand

Die erkennbare Abschwächung der beigemessenen Bedeutung und der einheitlichen Bewertung wird im Kostenelement Materialaufwand fortgeführt, dennoch sind beide Werte – Personalkosten und Materialkosten – für die weitere Betrachtung von großem Interesse.

Schulungsaufwand

Angefangen bei der Wartung und Inspektion über die geplante Instandsetzung hat sich der Mittelwert des Kostenelements Schulungsaufwand stets verringert, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass die Bedeutung bereits den anderen Phasen beigemessen wurde. In der betrieblichen Praxis ist es häufig so, dass ein und dasselbe Instandhaltungsteam die Arbeiten der Wartung, Inspektion und Instandsetzung übernehmen. Daher ist lediglich eine – recht umfangreiche – Schulung notwendig.

Reaktionszeit des Kundendienstes

Unerwartet hoch fiel die Bewertung für die Reaktionszeit des Kundendienstes aus. Mit einem Mittelwert von knapp 0,9 liegt dieses Kostenelement sogar über der Einstufung von MTBF und MTTR, wobei die Varianz ebenso gering ausfiel wie die des MTBF. Da die Kosten bei einem Maschinenausfall – v. a. in der Serienproduktion – enorm hoch sind, kommt diesem Kostenelement eine große Bedeutung zu.

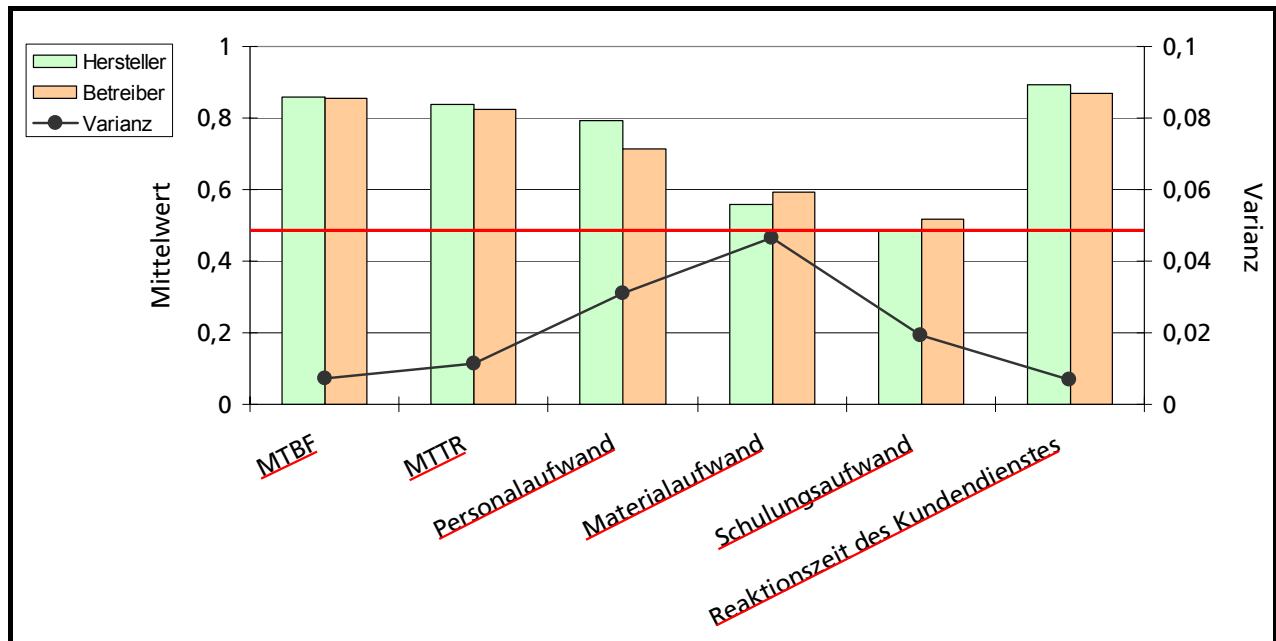


Abb. 4-20: Bedeutung der LCC-Elemente aus Instandsetzung (ungeplant)

4.2.2.1.6 Verwertungsphase

Lediglich die Sichtweise des ganzheitlichen Lebenszyklus bezieht die Kostenursachen der Verwertungsphase mit ein, die eine immer größere Rolle spielen. Zum einen werden die Auflagen zur umweltschutzgerechten Entsorgung stärker, zum anderen ist der Markt für Gebrauchsmaschinen ein lukratives Geschäft. Denn die Lebenszykluskostenbetrachtung zieht neben potentiellen Kostenursachen auch die Chancen z.B. eines Wiederverkaufs in Betracht. Es ist aber zu erkennen, dass die Bewertung der Bedeutung der Kostenelemente aus der Verwertungsphase im Vergleich zu den vorangegangenen Bewertungen recht gering ausfällt.

Demontage / Außerbetriebnahme

Die Bewertung für das Kostenelement Demontage / Außerbetriebnahme fiel zu gering aus. Aus dem Grund wird dieser Kostenpunkt nicht weiter betrachtet (Mittelwert von 0,22 aus Sicht der Hersteller und 0,35 aus Sicht der Betreiber).

Entsorgung

Die Auswirkungen der Entsorgungskosten werden im nächsten Punkt zusammengefasst, da der Rest-, Verkaufswert die negativen Entsorgungskosten widerspiegelt.

Rest-, Verkaufswert

Wie im vorherigen Punkt beschrieben, wird lediglich der Rest-Verkaufswert als relevant betrachtet, da er implizit (durch einen negativen Wert) auch als Entsorgungskosten in die Lebenszykluskostenberechnung einfließen kann.

Sanierung

Die Sanierungskosten erreichen im Schnitt nicht die Mittelwert-Schwelle von 0,5 und werden daher nicht weiter betrachtet.

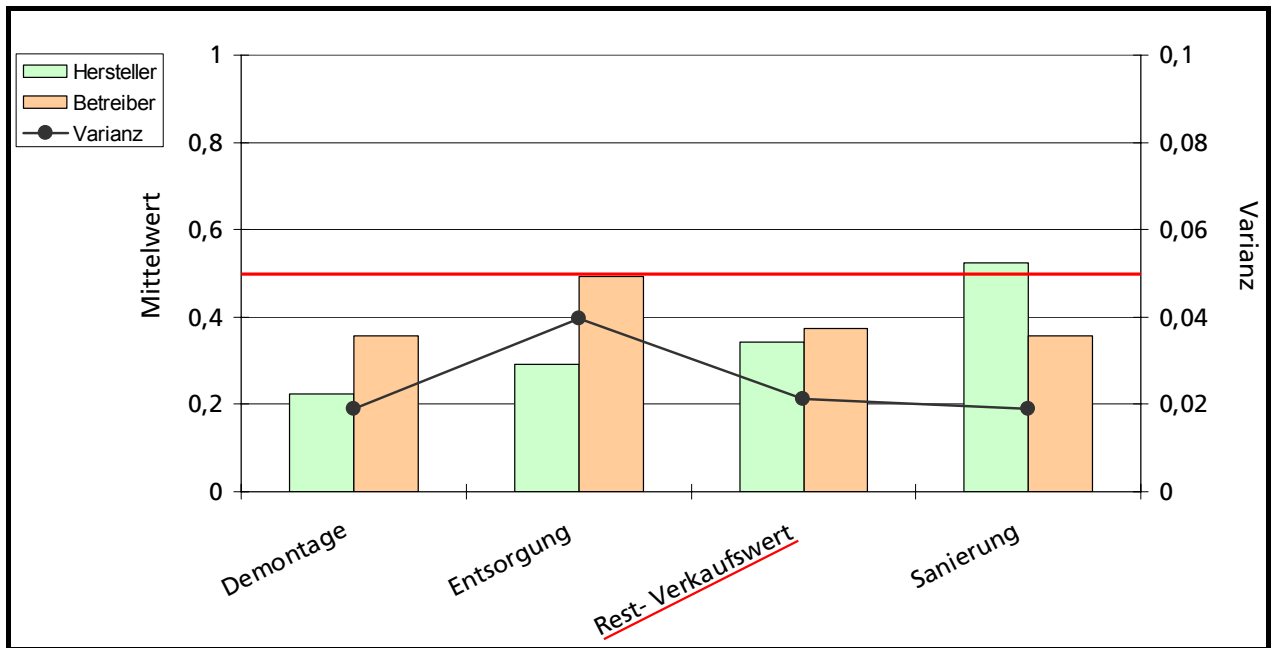


Abb. 4-21: Bedeutung der LCC-Elemente aus Verwertungsphase

4.2.2.5 Ergebnisse weiterer Fragen

Neben den Lebenszykluskosten ergaben sich in Interviews mit verschiedenen Industriepartnern noch weitere Fragestellungen, die in der vorliegenden Studie behandelt wurden. Im Folgenden werden die Antworten auf die Fragen analysiert.

- 1 Welche Bedeutung bei der Lieferantenauswahl hätte eine Zertifizierung nach Life-Cycle-Cost-Kriterien?
- 2 Wie schätzen Sie die Bedeutung von Diagnose- und Prognosesystemen in der Produktion ein?
- 3 Wie ist Ihre Bereitschaft, aufgrund höherer Garantieleistungen durch den Hersteller, mit diesem einen Wartungsvertrag abzuschließen?

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse dieser ersten drei Fragen vorgestellt. Der Aufbau der Schaubilder orientiert sich dabei an der grafischen Aufbereitung zur Auswahl der relevanten Lebenszykluskostenelemente.

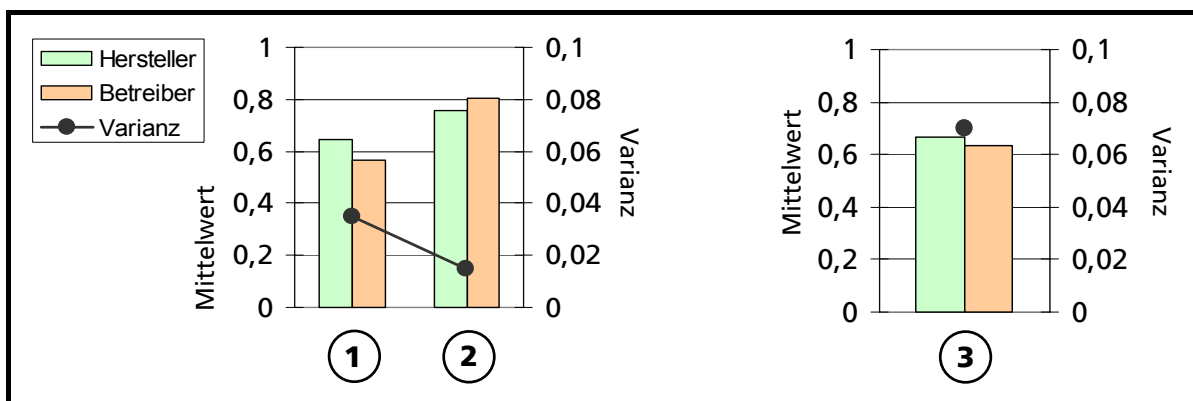


Abb. 4-22: Ergebnisse Fragen 1-3

Das Ergebnis der Auswertung zur *ersten Frage* lässt keine eindeutige Schlussfolgerung zu. Der Mittelwert liegt zwar mit 0,6 im leicht überdurchschnittlichen Bereich, jedoch war aus den teilweise handgeschriebenen Zusätzen auf den zurückgesandten Fragebögen herauszulesen, dass durch eine Zertifizierung im Bereich Lebenszykluskosten keine Präferenzen in der Wahl des Geschäftspartners abzuleiten sind. Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Geschäftsbeziehung müssen sich in der Praxis erfüllen und dürfen sich nicht ausschließlich an einer Zertifizierung orientieren. Man kann also im Zusammenhang der Zertifizierung lediglich von einer hilfreichen, aber nicht von einer hinreichenden Qualifizierung für den Aufbau einer neuen, an Lebenszykluskosten orientierten Geschäftsbeziehung sprechen.

Weitaus eindeutiger ist das Ergebnis zur *zweiten Frage* zu bewerten. Das spiegelt sich in der geringen Varianz von 0,015 wider. Der hohe Mittelwert von 0,76 seitens der Hersteller und über 0,8 seitens der Betreiber belegt die **hohe Relevanz**, die den Diagnose- und Prognosesystemen beigemessen wird. Auch die Bewertung der zukünftigen Bedeutung spricht eine klare Sprache: keines der befragten Unternehmen bewertete die Systeme als zukünftig unbedeutend (nicht in der Grafik abgebildet).

Ziel der *dritten Frage* ist es, eine mögliche Konstellation in der Vertragsvereinbarung zu finden, die beide Vertragspartner besser stellt. Dies wird klarer, wenn man auch die Formulierung aus der Sicht des Herstellers betrachtet. Die Grafik zu Frage 3 verdeutlicht, dass sowohl die Hersteller-, als auch die Betreiberfirmen die **Bereitschaft signalisieren, diesem Kompromiss zustimmen**. Selbstverständlich muss diese Konstellation in einer Vertragsvereinbarung explizit festgelegt werden, aber durch die Studie wurde belegt, dass die Kompromissbereitschaft auf beiden Seiten vorhanden ist. Dabei ist zu erkennen, dass die Bereitschaft der Hersteller, höhere Garantieleistungen im Gegenzug zum Wartungsvertrages zu erbringen etwas höher ausgeprägt ist, als die der Betreiber, einen Wartungsvertrag mit dem Hersteller als „Ausgleich“ für mehr Garantieleistungen abzuschließen. Der Unterschied ist aber marginal und dürfte sich nicht auf die Kooperationsbereitschaft der Vertragspartner auswirken.

Nachdem in Frage 2 die grundsätzliche Einschätzung der Bedeutung von Diagnose- und Prognosesystemen abgefragt wurde, gehen die folgenden Fragen einen Schritt weiter und wollen die Erhöhung der Verfügbarkeit durch den Einsatz solcher Systeme klären.

- ④ Um wie viel Prozent lässt sich Ihrer Einschätzung nach die technische Maschinenverfügbarkeit durch den Einsatz eines Diagnosesystems erhöhen?
- ⑤ Um wie viel Prozent lässt sich Ihrer Einschätzung nach die technische Maschinenverfügbarkeit durch den Einsatz eines Prognosesystems erhöhen?

Abbildung 4-23 verdeutlicht die Ergebnisse der Auswertung grafisch. Man kann leicht erkennen, dass dem Diagnosesystem eine größere Kompetenz in der positiven Beeinflussung der Verfügbarkeit beigemessen wird. Allerdings stimmt das nur bedingt, da sich diese Aussage lediglich auf die Herstellerfirmen bezieht, die (bei einem Ausgangswert von 95%) eine Veränderung von 1,6% für möglich halten. Durch den Einsatz eines Prognosesystems ist nach Einschätzung der Hersteller lediglich ein Anstieg von 1,51% denkbar.

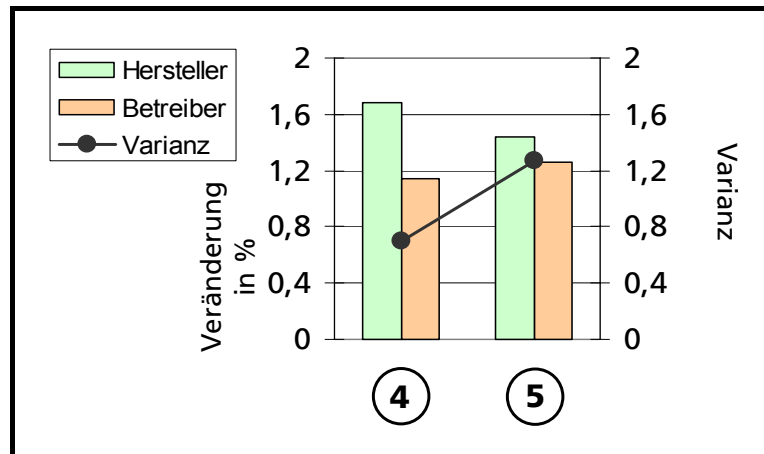


Abb. 4-23: Ergebnisse der Fragen 4 und 5

Eine dazu gegenläufige Einschätzung liefert die Bewertung der Betreiber, die dem Einsatz eines Prognosesystems größere Bedeutung beimessen. Grund dafür kann sein, dass der Betreiber größeren Wert auf eine Vorhersage für einen möglichen Produktionsausfall oder ein Maschinenversagen legt, um möglichst früh gegen die sich andeutende Störung vorgehen zu können. Der Grund der Störung ist aus der Sicht des Betreibers zweitrangig. Ganz im Gegensatz zur Position des Herstellers. Um im Wettbewerb zu bestehen, ist er darauf angewiesen, seine Maschinen ständig zu verbessern und ihre Zuverlässigkeit zu erhöhen. Das geht aber nur, wenn er in Erfahrung bringen kann, welche Bauteile der Maschine für den Ausfall verantwortlich sind. Daher verbindet u.U. der Hersteller mit einem Diagnosesystem einen größeren Nutzen als der Betreiber.

- 6 Wären Sie bereit, im Gegenzug höherer Garantieleistungen, Felddaten über das Maschinenverhalten an den Hersteller zu senden (ähnlich einem Black-Box-Modell)?

Die *sechste* und letzte *Frage* aus dem Workshop ist eine Modifikation aus Frage 3, da als Gegenleistung für eine höhere Garantiezusage seitens des Herstellers die Rücksendung von qualitativ hochwertigen Daten über das Maschinenverhalten (v. a. die genaue Ausfallursache) von Seiten des Betreibers steht. Als Vergleich: in der dritten Frage war die Gegenleistung des Betreibers die Zusage eines Wartungsvertrags mit dem Hersteller. Folgende Abbildung 4-24 zeigt das Ergebnis.

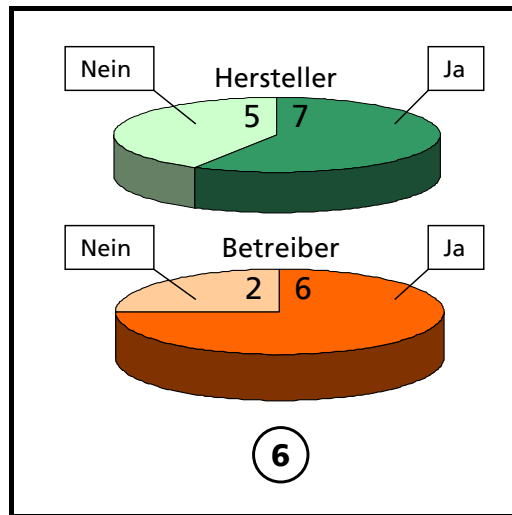


Abb. 4-24: Ergebnis der Frage 6

Da es sich bei der sechsten Frage um eine reine Entscheidungsfrage handelt (geschlossene Frageform), kann das Ergebnis nicht wie bisher in der gewohnten Art und Weise abgebildet werden. Anstelle des Balkendiagramms kommt das Kuchendiagramm zu Einsatz, das die Aufteilung der gegebenen Antworten sehr gut darstellt. Nicht alle befragten Betreiberfirmen haben sich zu dieser Frage geäußert, deshalb ist nur die Antwort von 8 anstatt 10 Befragten zu bewerten.

Grundsätzlich ist eine recht positive Haltung bezüglich des vorgestellten Kompromiss zu erkennen, wobei aus Betreibersicht eine größere Bereitschaft besteht. Lediglich 2 Betreiberfirmen wären nicht bereit, im Gegenzug höherer Garantieleistungen, Maschinendaten an den Hersteller zurückzusenden. Auch positiv, aber etwas zurückhaltender ist die Einstellung der Herstellerfirmen, von denen 7 der insgesamt 12 befragten Unternehmen einer solchen Vereinbarung zustimmen würden.

4.3 Entwurf des Softwaretools (AP3)

Im Folgenden werden die Softwarefunktionen aus den bestehenden Anforderungen der Partner abgeleitet. Leitlinie ist dabei eine so weit möglich vollständige Abbildung des Angebotserstellungsprozesses, eine möglichst einfache und an Gewohntem orientierte Bedienung sowie eine hohe Automatisierung. Des Weiteren soll es die Software den Angebotserstellenden erlauben, die von der Software bestimmten Werte jederzeit entsprechend der eigenen Vorstellungen anzupassen. Den Prozess, den die Software dabei in den in diesem Kapitel beschriebenen Schritten abbildet, ist in Abbildung 4-25 dargestellt.



Abb. 4-25: Angebotserstellungsprozess

Im Einzelnen soll die zu entwerfende Software folgende Funktionen haben:

1. Auswahl und Konfiguration der betrachteten Bauteile

In einem Menü muss auswählbar sein, ob alle relevanten Bauteile betrachtet werden sollen, oder nur eine selbst definierte Auswahl. Durch die Möglichkeit anstatt aller als lebensdauerrelevant definierten Teile nur eine Auswahl von ihnen für die LCC-Berechnung zu betrachten, lässt sich die Software individuellen Anforderungen anpassen. So erlaubt es diese Möglichkeit beispielsweise, wie im TCO-Vertrag von DaimlerChrysler nur für ausgewählte Funktionsgruppen die gewünschten Parameter zu berechnen, während andere ausgelassen werden.

2. Eingabe verschiedener globaler Parameter

Eingabe zentraler Werte, wie zum Beispiel die geplante Nutzungsdauer der Maschine, die Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr, den Stundensatz für Bedienung usw.

3. Bestimmung der Lebenszykluskosten-Elemente

In einem Menü muss auswählbar sein, welche Kennzahlen berechnet werden sollen. Die Software ermöglicht die Berechnung mehrerer Lebenszykluskostenelemente. Allerdings ist es nicht in jedem Fall notwendig, alle LCC-Elemente zu bestimmen, weil eventuell für das Angebot, dessen Lebenszykluskosten mit der Software berechnet werden, nur ausgewählte Elemente von Interesse sind.

4. Anzeige und Export der errechneten Werte

z.B. in eine Excel-Datei und Ausgabe der Angebotsunterlagen.

5. Datenbank mit Ausfalldaten aus den verschiedenen Datenquellen

4.3.1.5 Auswahl und Konfiguration der betrachteten Bauteile

Die importierten Daten sollten bereits mit einem Verweis versehen sein, ob es sich um Verschleiß- oder Ersatzteile handelt, und sie somit für die Berechnung der Instandhaltungs- beziehungsweise Instandsetzungskosten relevant sind. In den Standardeinstellungen werden alle so markierten Teile für die Bestimmung der LCC-Elemente verwendet; es ist allerdings möglich, manuell Bauteile oder auch ganze Funktionsgruppen aus der Berechnung der Kennzahlen der Maschine auszuschließen.

Die folgende Abbildung stellt eine Möglichkeit dar, wie die Benutzeroberfläche für die Komponenten-Auswahl der Software gestaltet werden kann. Links ist der Maschinenbaum zu sehen, in dem die momentan zu bearbeitende Komponente ausgewählt werden kann:

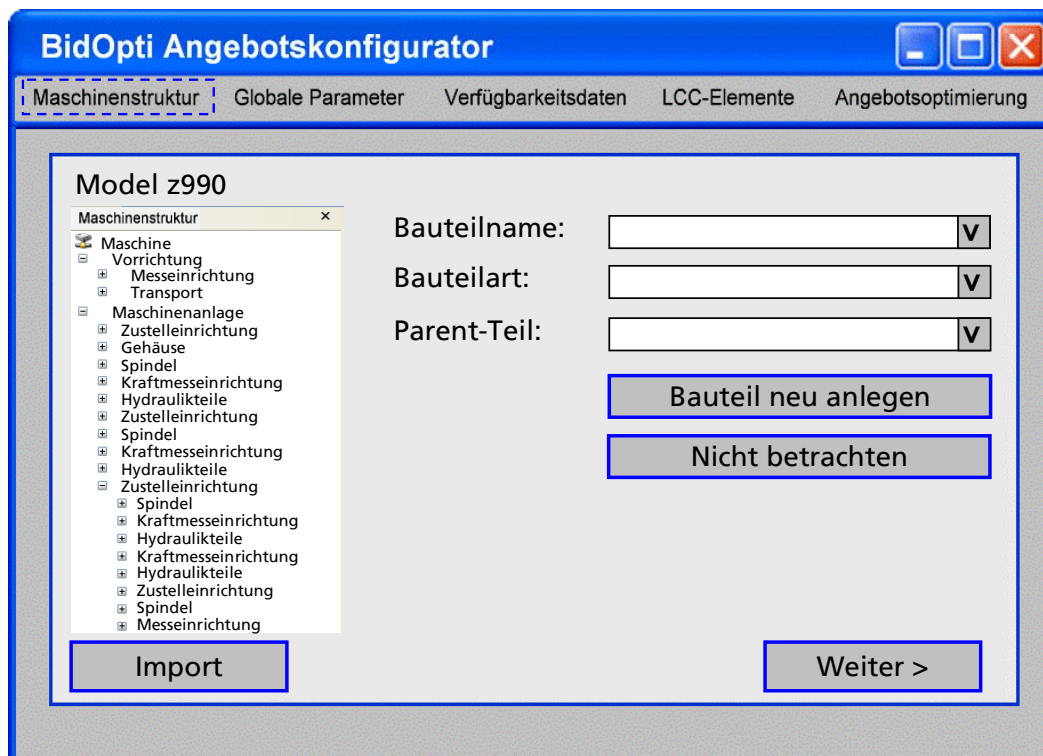


Abb. 4-26: Auswahl der Bauteile

4.3.1.6 Eingabe verschiedener globaler Parameter

Die zentralen Parameter der Maschine werden per Hand eingegeben. Sie werden auf Maschinenebene gespeichert und werden aus einer Datenbank ausgelesen, sofern sie schon abgespeichert wurden. Dies sind zum Beispiel:

- Herstellername
- Zuständiger Ansprechpartner des Herstellers
- Kundenname
- Zuständiger Ansprechpartner des Kunden
- Genaue Bezeichnung der konstruierten Maschine, ggf. Maschinenummer

- Geplante Anzahl an Betriebsstunden pro Jahr
- Geplante Nutzungsdauer (in Jahren)
- Stundensatz für Bedienung, Instandhaltung und Instandsetzung
- Schulungskosten für Bedienung, Instandhaltung und Instandsetzung

Abb. 4-27: Metadaten

Die manuell eingepflegten Daten werden von der Software eingelesen und dann im nächsten Schritt, der Berechnung der Lebenszykluskostenelemente, weiter verwendet.

4.3.1.7 Eintragung der Zuverlässigkeitsdaten

Zur Eintragung der Verfügbarkeitsdaten gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die Daten werden aus einem so genannten Logfile, der Ausfallhistorie eines Bauteils ausgerechnet: Weibull-Analyse
2. Die Werte werden für ein Bauteil direkt eingetragen. Dieser Weg wird gewählt, wenn die Daten aus einer FMEA oder vom Zulieferer direkt vorliegen oder wenn die von der Software berechneten Werte als nicht korrekt angesehen werden.

Die Software gibt die Parameter der Weibull-Verteilung für jedes einzelne atomare Bauteil an, ebenso die MTBF und die MTTR. Für übergeordnete Komponenten können keine Verteilungsparameter angegeben werden, da hier keine Verteilungshypothese gemacht wird. Deren Ausfallverhalten wird simuliert. Links ist der Maschinenbaum zu sehen:

Abb. 4-28: Eintragung der MTBF- und MTTR-Werte

4.3.1.8 Bestimmung der Lebenszykluskosten-Elemente

Der Begriff Lebenszykluskosten-Elemente, auch LCC-Elemente abgekürzt, bezeichnet alle Faktoren, die einen Anteil an den Gesamtkosten einer Maschine über ihren gesamten Lebenszyklus haben. Bei der Berechnung von Lebenszykluskosten muss zunächst festgelegt werden, welche Phasen im Lebenszyklus betrachtet werden und welche Elemente in jeder Phase zu berücksichtigen sind.

4.3.1.9 Anzeige und Export der errechneten Werte

Die berechneten LCC Elemente werden nicht nur in einer Ausgabemaske auf dem Monitor des Nutzers angezeigt und in ein Textdokument exportiert, sondern auch in der im Programm integrierten Datenbank gespeichert. Die ermittelten Werte können so direkt in ein anderes Programm exportiert werden, beispielsweise nach MS Excel.

In der untenstehenden Abbildung sind die Entstehungskosten als horizontale Linie eingezeichnet, die gemeinsam mit den als Gerade eingezeichneten deterministischen Betriebskosten den Kostensockel für die stochastischen Betriebskosten legen, deren Erwartungskurve als dicke schwarze Linie eingezeichnet ist. Interessant für den Angebotserstellenden ist die gestrichelte Linie, die den Konfidenzbereich für die stochastischen Betriebskosten angibt. Ziel der Betrachtung ist eine Aussage darüber, welche Kosten zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden.

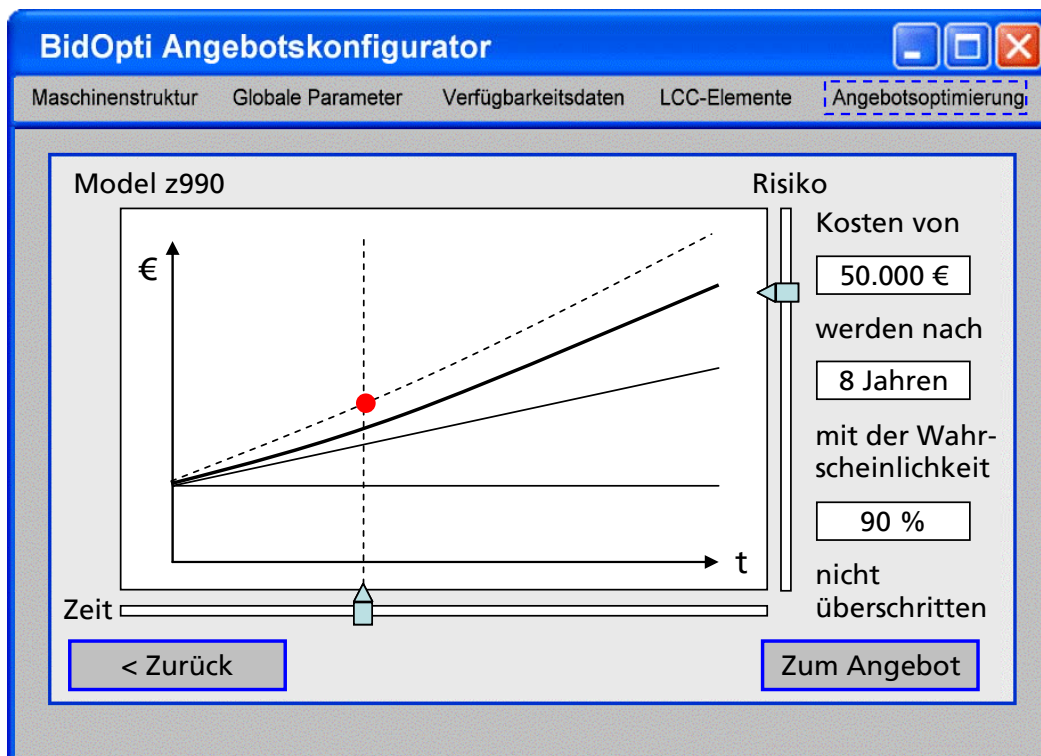


Abb. 4-29: Darstellung der prognostizierten Kosten

4.3.1.10 Datenbank mit Ausfalldaten aus den verschiedenen Datenquellen

Die Software besteht neben den beschriebenen Anwendungsprogrammen auch aus einer Datenbank, in der alle Daten abgelegt sind, die für die Berechnung der Lebenszykluskosten notwendig sind. Im Wesentlichen sind das die Ausfalldaten der Bauteile, aus denen die Werkzeugmaschine aufgebaut sein kann.

4.4 Datenaufnahme, Berechnung und Prognose der LCC (AP4)

Ziel des vorliegenden Arbeitspakets ist die Bereitstellung der Algorithmik zur Berechnung und Prognose der LCC von Maschinen und Anlagen. Hierfür wurden zunächst bei den 3 Maschinenbaupartnerunternehmen die Zuverlässigkeit und die Lebenszykluskosten aufgenommen. Im Detail kann an dieser Stelle aus Geheimhaltungsgründen nur auf die Algorithmik und nicht auf die Ergebnisse eingegangen werden. Ein repräsentatives Beispiel aus der Literatur zeigt Abbildung 4-30.

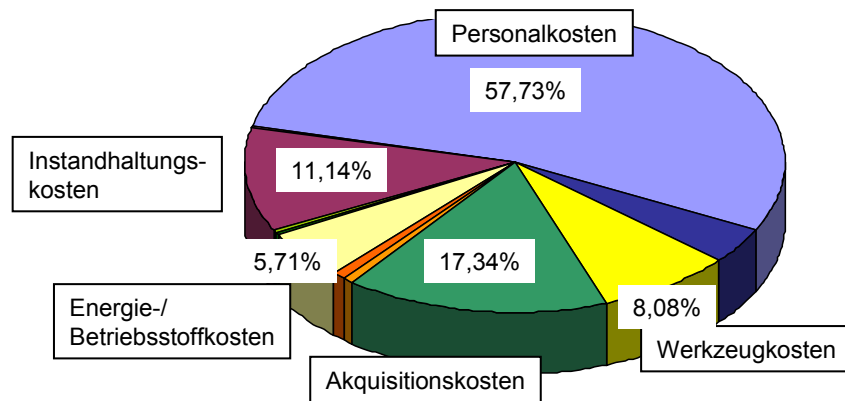


Abb. 4-30: Lebenszykluskosten eines Bearbeitungszentrums [Kra-04]

4.4.1 Maschinenzuverlässigkeitsuntersuchung

Die Zuverlässigkeit kann entweder mit Hilfe einer Verteilungsfunktion oder mit Hilfe des Erwartungswerts, dem MTBF-Wert beschrieben werden. Für die Bestimmung der Zuverlässigkeit steht bereits eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung, von denen einige die im Folgenden hinsichtlich des vorliegenden Anwendungsfalls beschrieben werden.

Es können zunächst Analyse- und Prognosemethoden unterschieden werden. Analysemethoden basieren dabei auf Daten, sind als retrospektiv ausgerichtet, während Prognosemethoden wissensbasiert sind und damit auf Erfahrung basieren. Insofern ausreichend Daten vorhanden sind, ist die Weibull-Analyse [DIN-04] die genaueste Methode. Sind aber keine Daten vorhanden, so bietet sich die Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA) als Kompensation an. Diese Vorgehensweisen finden sämtlich Anwendung für Einzelkomponenten. Für die notwendige Systembetrachtung bei Maschinen und Anlagen bietet sich die Monte-Carlo-Simulation an.

4.4.1.1 Bestimmung der 2-parametrischen Weibullverteilung

Für die Bestimmung der 2 Parameter der Weibullverteilung wird in der Regel die so genannte Weibull-Analyse nach DIN IEC 61649 [DIN-04] verwendet. Sie verläuft im Wesentlichen in 4 Schritten:

- 1) Aufsteigendes Sortieren der Ausfallzeitpunkte (aus Daten)
- 2) Berechnung z.B. des Median Ranks mit der Bernard Näherung:

$$F(t) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (4-6)$$

- 3) Linearisierung: Durch zweimaliges Logarithmieren mit dem natürlichen Logarithmus entsteht die linearisierte Form:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta) \quad (4-7)$$

Mit $y = mx + c$:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right)$$

$$m = \beta \tag{4-8}$$

$$x = \ln(t)$$

$$c = -\beta \cdot \ln(\eta)$$

Aus dieser Berechnung bekommt man für jede Ausfallzeit t einen x - und einen y -Wert. Diese Menge an Punkten wird nun durch eine Gerade angenähert, so dass die Gerade dem Kriterium der kleinsten Quadrate genügt.

$$\text{Kleinste Quadrate} = \sum_{i=1}^n (y_i - (mx_i + c))^2 \tag{4-9}$$

Dies lässt sich für die Gerade der Form $y = mx + c$ eindeutig berechnen durch:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \tag{4-10}$$

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - mx_i) \tag{4-11}$$

Daraus folgt für die Weibullverteilungsparameter:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \tag{4-12}$$

$$\eta = e^{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta x_i)}{\beta}} \tag{4-13}$$

Somit können die Parameter der Weibull-Verteilung also direkt aus Daten berechnet werden. Der Stichprobenumfang sollte dabei größer als 10 Ausfälle sein.

In der Regel sind die Daten auch von Baugruppen vorhanden, die nicht ausgefallen sind, da sie zum Zeitpunkt der Analyse noch in Betrieb sind. Diese Daten nennt man gestutzte Daten, die durch eine Anpassung des Rangs entsprechend berücksichtigt werden können und das Ergebnis verbessern, da sonst die Zuverlässigkeit zu pessimistisch eingeschätzt wird. Der angepasste Rank ergibt sich dabei aus:

$$\text{angepasster Rank} = \frac{(\text{inverser Rank}) \cdot (\text{vorheriger angepasster Rank}) + (N + 1)}{(\text{inverser Rank}) + 1} \tag{4-14}$$

wobei N die Gesamtzahl der Stichproben ist, der inverse Rank sich aus $(N - \text{Rank} + 1)$ ergibt und der vorherige angepasste Rank der angepasste Rank der vorhergehenden ausgefallenen Stichprobe ist.

4.4.1.2 Bestimmung der 3-parametrischen Weibullverteilung

Dieses Verfahren wurde im Rahmen des Projekts ViLMA entwickelt, um die Möglichkeit einer besseren Annäherung durch eine 3-parametrische Weibullverteilung zu bekommen. Das Verfahren sucht geeignete Parameter für eine Verteilung, in dem es sie jeweils mit den gemessenen Daten testet und die Werte entsprechend der Ergebnisse des Tests anpasst.

Vereinfacht gesprochen entspricht das Verfahren der Idee der binären Suche. Ein bekanntes mathematisches Spiel ist es, eine von einem Spieler zufällig gewählte Zahl zwischen 0 und 100 zu erraten. Dabei sagt der Spieler, der die Zahl kennt, dem Spieler, der die Zahl erraten muss, immer nur, ob die von ihm zuletzt geratene Zahl größer oder kleiner als die zu erratende Zahl ist. Mit der richtigen Strategie ist die Zahl in maximal sieben Schritten erraten. Dabei wird der Zahlenbereich, in dem die Zahl sich befindet, immer weiter halbiert, bis der Bereich nur noch die Größe 1 hat. Die erste Schätzung ist somit immer 50, die nächste Schätzung, je nachdem, ob die Zahl größer oder kleiner ist, 25 oder 75 usw. Durch die Halbierung des Zahlenbereiches bei jedem Schritt ergibt sich für die maximale Anzahl der Schritte aus:

$$1 > \frac{100}{2^N} \Rightarrow N > \log_2 100 \approx 6,64 \quad (4-15)$$

Um zu bestimmen, ob der beste Parameter größer oder kleiner als der momentan gewählte Parameter ist, wird bei diesem Verfahren ebenfalls als Maß für die Annäherung der Verteilungsfunktion an die Stichprobe die Methode der Kleinsten Quadrate verwendet.

$$\text{Kleinste Quadrate} = \sum_{i=1}^n (y_i - (1 - e^{-\frac{t_i - \gamma}{\eta}^\beta}))^2 \quad (4-16)$$

Auch die Bestimmung von $F_i(t)$ kann analog durchgeführt werden, oder durch die einfachere Form:

$$F_i(t) = \frac{i}{n} \quad (4-17)$$

Allerdings wird hier nicht der Umweg über die Linearisierung gegangen, sondern es wird versucht, direkt die Weibull-Verteilungsfunktion an die Statistik anzunähern. Der einfachste Fall mit einer Variablen stellt sich wie folgt dar: Die Kleinsten Quadrate werden mit zwei verschiedenen Werten der Variable berechnet.

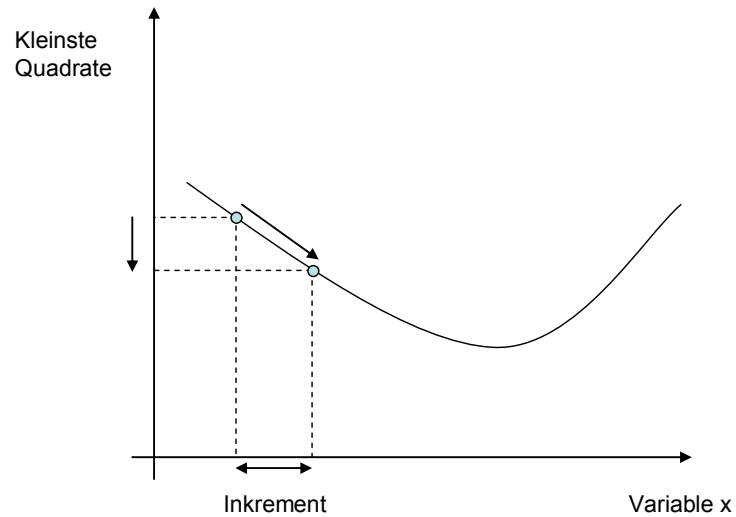


Abb. 4-31: Auswirkung der Veränderung der Variable um ein Inkrement

Hat z.B. die Erhöhung der Variable die Kleinsten Quadrate gesenkt, so ist der Wert des besten Parameters also höher und die Variable wird weiter um ein Inkrement erhöht sowie jeweils der Wert der Kleinsten Quadrate berechnet, bis der Wert wieder steigt. Anschaulich hat die Variable in diesem Fall das Minimum der kleinste Quadrate überschritten.

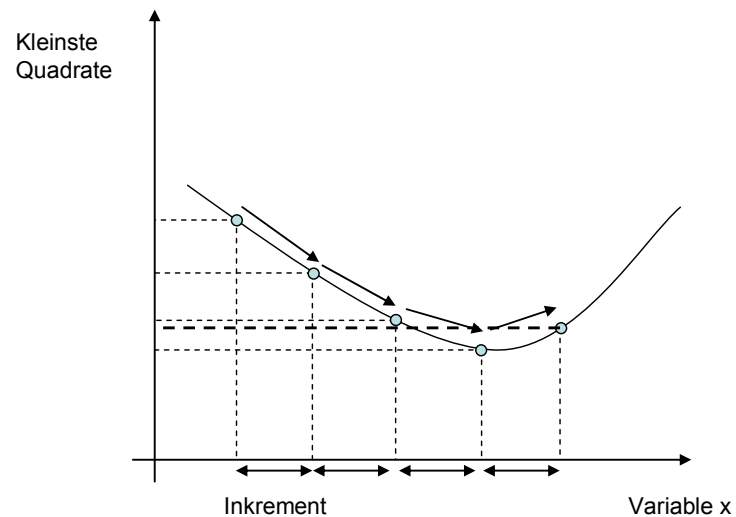


Abb. 4-32: Überschreiten des Minimums

Nun wird die Richtung umgedreht und das Inkrement halbiert. Diese Schritte werden wiederholt bis das Inkrement eine untere Schranke unterschreitet oder die maximale Anzahl der Schritte erreicht ist.

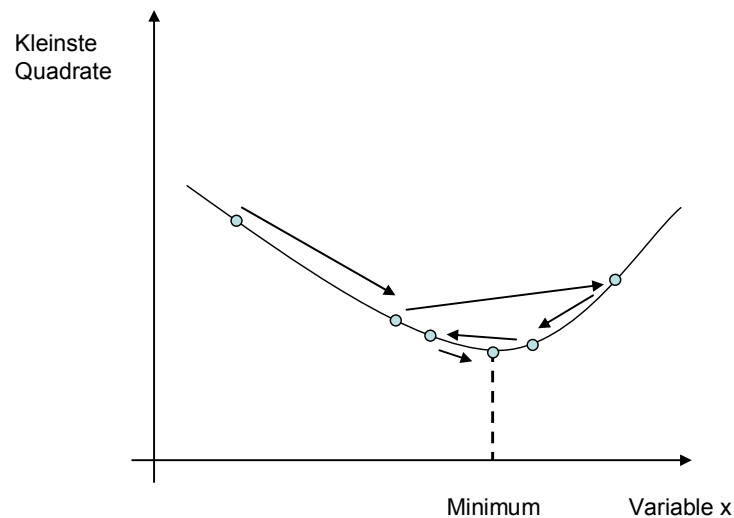


Abb. 4-33: Konvergenz am Minimum

Bei mehreren Variablen wird immer nur eine Variable geändert und ihre Auswirkungen auf die Kleinsten Quadrate beobachtet. Jeder Variable wird dabei ein eigenes Inkrement zugeordnet und damit unabhängig von den Anderen geändert.

Dieses Verfahren kann folgendermaßen dargestellt werden:

Wiederhole bis (Inkrement < bestimmter Wert) oder (n-mal)

Wenn (Wert der kleinsten Quadrate vor die Variable geändert wurde > Wert der kleinsten Quadrate nachdem die Variable geändert wurde) dann (war die Richtung der Änderung falsch) sonst (war sie richtig)

Wenn (die Richtung der Änderung falsch war) dann (ändere die Richtung) und (halbiere das Inkrement)

Wenn (die Richtung richtig war) dann (gehe weiter bei gleichem Inkrement)

Dieses Verfahren kann auch für den 3-parametrischen Fall eingesetzt werden und ermittelt sehr gute Schätzer. In diesem Fall sind folgende Bedingungen zu beachten:

- η muss immer größer oder gleich Null bleiben, da vor dem Start der Betrachtung noch keine betrachteten Teile ausgefallen sein können.
- γ muss aus dem selben Grund ebenfalls größer oder gleich 0 sein, darf aber auch nicht größer sein als der Zeitpunkt des ersten Ausfalls einer Komponente, da bis zum Zeitpunkt $t = \gamma$ die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall gleich 0 ist und im Falle eines Ausfalls die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall offensichtlich größer als 0 ist.

Um das Verfahren zu testen wird ihm anstatt einer Stichprobe eine exakt weibullverteilte Punktemenge gegeben und ermittelt, ob die eingegebenen Verteilungsparameter ermittelt werden. Die folgenden Grafiken zeigen die schrittweise Annäherung für $\beta = 1,5$, $\eta = 0,8$ und $\gamma = 0,1$.

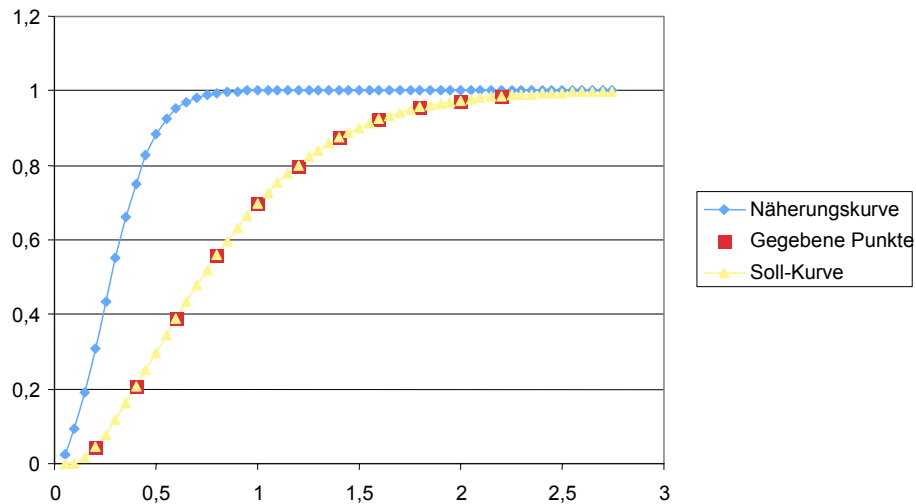


Abb. 4-34: Annäherung nach 20 Schritten

Die Soll-Kurve ist die Weibull-Kurve, aus der Punkte (Gegebene Punkte) dem Algorithmus vorgegeben wurden. Die Näherungskurve zeigt die bisherige Näherung an, hier nach 20 Schritten. Nach einer hohen Anzahl von Schritten, hier 10.000, meistens auch schon deutlich schneller, findet der Algorithmus eine sehr gute Näherung, wie in der nächsten Grafik dargestellt.

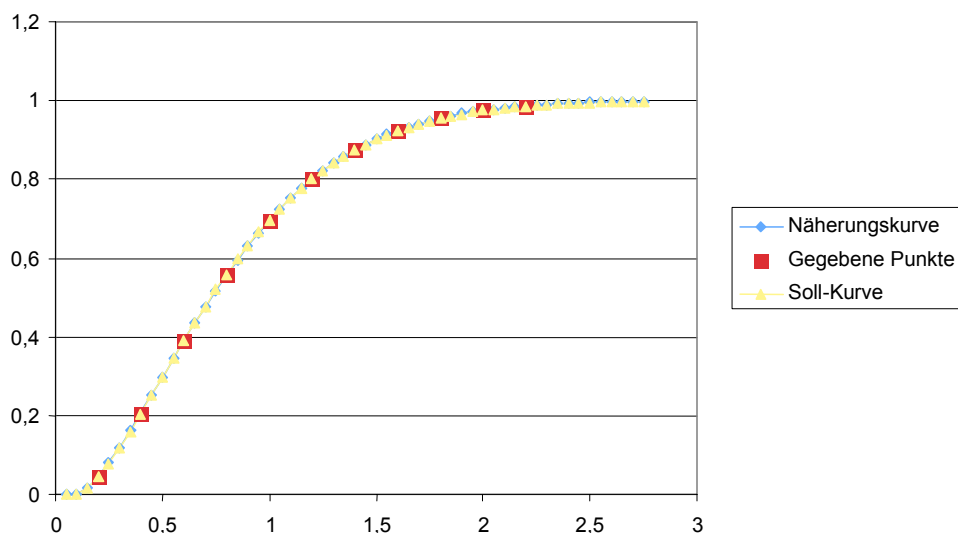


Abb. 4-35: Annäherung nach 10.000 Schritten

Den Verlauf der Kleinsten Quadrate bei dieser Annäherung wird in der nächsten Grafik dargestellt. In diesem Fall ist die Summe der quadrierten Abstände nach 10.000 Schritten auf etwa $8 \cdot 10^{-5}$ gesunken. Der eigentlich erreichbare Abstand von 0 (da die Eingabewerte exakt weibullverteilt waren) wird auf Grund von Rundungen nicht erreicht.

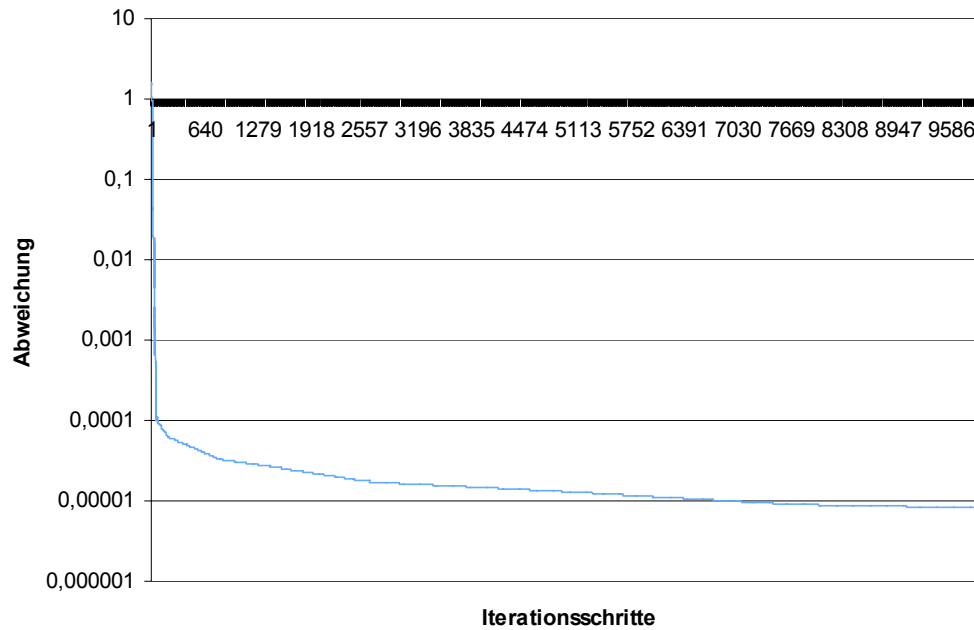


Abb. 4-36: Konvergenz der Kleinsten Quadrate

Damit möglichst schnell ein guter Wert erreicht wird, müssen geeignete Anfangswerte für die drei Parameter gefunden werden. Als grober Schätzer für β wird eine stark vereinfachte Variante des Verfahrens aus der DIN-Norm verwendet. Dabei wird die Steigung zwischen dem ersten und dem zweitletzten Punkt der Stichprobe im doppellogarithmischen Koordinatensystem nach folgender Formel bestimmt:

$$\beta_{Start} = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_{n-1}(t)}\right)\right) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_1(t)}\right)\right)}{t_{n-1} - t_1} \quad (4-18)$$

Der zweitletzte Punkt wird deshalb gewählt, da die Gleichung für $F_n(x) = 1$ nicht lösbar ist. Für

η wird der der Zeitpunkt genommen, an dem der Ausfall mit dem Rang $\left\lceil \frac{1 - \frac{1}{e}}{n} \right\rceil$ passiert, wobei

n die Größe der Stichprobe beschreibt. Für γ wird als Startwert die 0 gewählt. Für eine beliebige Stichprobe sieht die Annäherung dann wie in folgender Grafik aus:

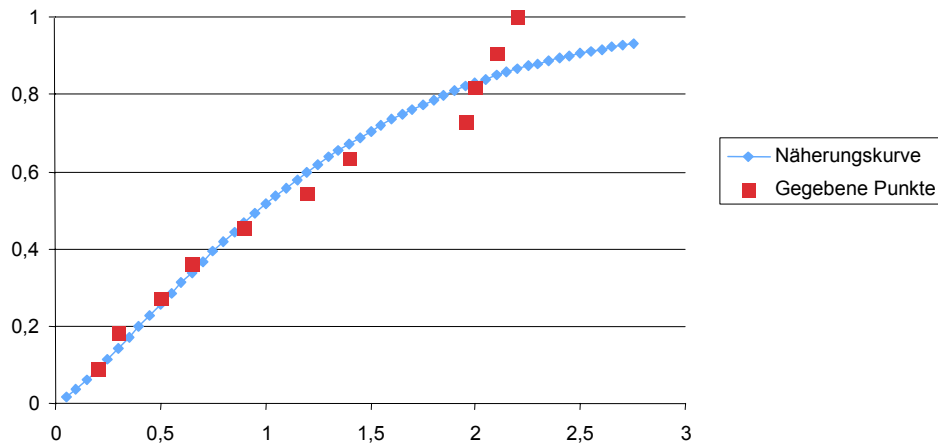


Abb. 4-37: Annäherungskurve an Stichprobe

4.4.1.3 Bestimmung der Badewannenkurve

Die weithin bekannte Badewannenkurve besteht aus 2 Weibullverteilungen und 1 Exponentialverteilung. Um sie zu bestimmen müssen also 5 Verteilungsparameter bestimmt und 2 Grenzen zwischen den Verteilungen bestimmt werden. In den vorstehenden Kapiteln wurde ausführlich gezeigt, wie die Verteilungsparameter bestimmt werden können. Im Folgenden soll nun darüber hinaus noch gezeigt werden, wie sich die Grenzparameter bestimmen lassen.

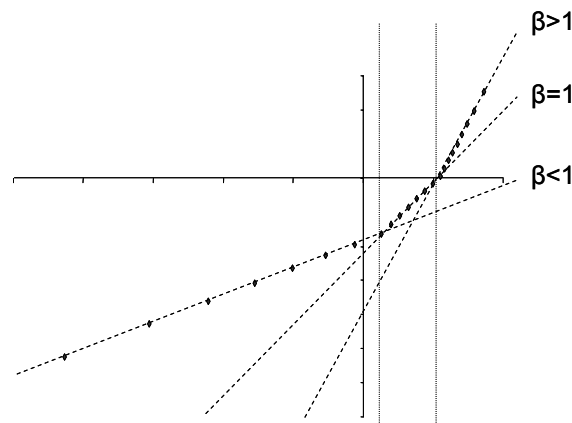


Abb. 4-38: Doppellogarithmische Darstellung einer dreiphasigen Weibull-Kurve

In Abbildung 4-38 wird eine ideale dreiphasige Weibull-Kurve in doppellogarithmischer Form dargestellt. Die Näherungsgeraden sind gestrichelt dargestellt, die Phasengrenzen gepunktet. Gut zu erkennen ist der Knick, den die Kurve an jeder Phasengrenze beschreibt. Als Lösungsansatz für das Finden der Grenzen wird daher das Finden dieser Knicke vorgeschlagen.

Dieses Problem ist im idealen Fall sehr einfach. Wird vom ersten Punkt (ersten Ausfall) ausgehend schrittweise mit jeweils einem weiteren benachbarten Punkt zusätzlich über lineare Regression die Steigung der Näherungsgeraden bestimmt, so wird die Steigung bis zum Erreichen der Grenze konstant die Steigung der ersten Phase sein. Sobald der nächste hinzugenommene Punkt nicht mehr zu der ersten Phase gehört, wird die Steigung ansteigen. Daraus lässt sich folgern, dass der letzte Punkt, für den gilt, dass die Näherungsgerade die minimale Steigung hat, die erste Phasengrenze beschreibt. Wenn man nun vom nächsten Punkt ausgehend das Verfahren wiederholt, findet man die zweite Phasengrenze. Nicht trivial wird das Verfahren im nicht idealen Fall wie er in folgender Abbildung dargestellt wird.

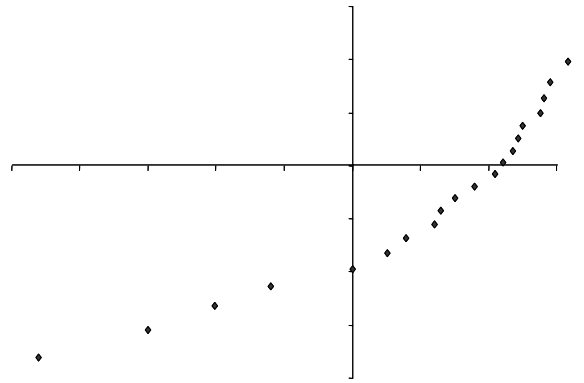


Abb. 4-39: Ausfallstatistik in doppellogarithmischer Darstellung

Das Minimum der Steigung kann hier nun schon viel früher erreicht werden und die Grenzen würden zu eng geschätzt. Hier muss nun ein Maß für die zulässige Abweichung gefunden werden. Dieses Maß muss abhängig von dem Streuungsgrad der Statistik sein, das heißt, je stärker die Statistik vom Ideal abweicht, umso größer muss die zulässige Toleranz sein.

Ein Lösungsvorschlag wäre hier den letzten Punkt zu suchen, bei dem die Näherungsgerade weniger als ein von der Streuung bis zu diesem Punkt abhängiges Maß von dem Minimum aller Steigungen entfernt ist.

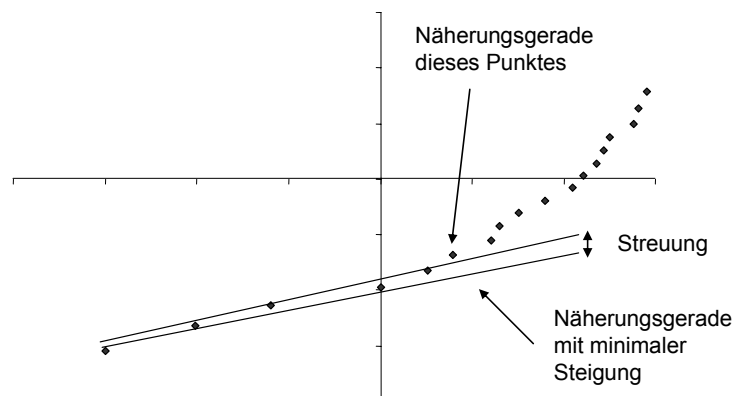


Abb. 4-40: Suchen der Grenzen

Dieses Verfahren ist bis zu einem gewissen Maße tolerant gegenüber Streuungen. Fehler durch sehr starke Ausreißer in der Statistik können dadurch jedoch nicht vermieden werden. Daher wird vorgeschlagen, nicht nur nach zwei Knicken zu suchen (für zwei Phasengrenzen), sondern nach beliebig vielen und anschließend die einzelnen Bereiche anhand des ermittelten β zuzuordnen.

Um einen Bereich der exponentialverteilten Phase der Zufallsausfälle zuzuordnen zu können, in dem im Ideal $\beta=1$ gilt, muss eine Schranke um β herum gefunden werden, das heißt ein Wert für σ festgelegt werden, für den gilt $1-\sigma \leq \beta_i \leq 1+\sigma$ (wobei β_i das β eine Näherung an eine exponentialverteilte Stichprobe ist). Der Wert von σ müsste wiederum von der Streuung der Stichprobe abhängen.

4.4.1.4 Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA)

Die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) wurde in den 60er Jahren im Rahmen von Vorhaben der NASA entwickelt und in Projekten der Luft und Raumfahrttechnik eingesetzt (vgl.

[DoD-80]). In Deutschland wurde die FMEA im Jahr 1980 unter der Bezeichnung Ausfalleffektanalyse in der DIN 25448 und der VDA Richtlinie „Sicherung der Qualität vor Serviceeinsatz!“ genormt [DIN-90a, VDA-86].

Die FMEA Methode ist entwickelt worden, um schon im Planungsstadium bei der Entwicklung eines Produktes oder der Konzeption von Fertigungsverfahren potentielle Fehler, deren Folgen und Ursachen aufzuzeigen, die Risiken abschätzen und effektive Maßnahmen zu ihrer Vermeidung durchführen zu können. D.h. durch ein präventives Risikomanagement sollen Unternehmensziele, wie z.B.: Steigerung der Zuverlässigkeit von Produkten, störungsarme Produktionsanläufe oder wirtschaftliche Fertigung unterstützt werden [Bla-02]. Die FMEA-Methode geht von der Überlegung aus, dass es wesentlich wirtschaftlicher ist, mögliche Ausfallursachen zu vermeiden, als aufgetretene Ausfälle zu beseitigen. Tatsache ist, dass ein Großteil der Fehler am Ende eines Prozesses oder gar erst im Einsatz entdeckt wird, obwohl die Fehlerentstehung schon in der Planungsphase ihren Ursprung hat. Das bedeutet eine Potenzierung der Aufwendungen für Fehlleistungen. Dieser Zusammenhang ist durch die so genannte „Zehnerregel“ bekannt. Die „Zehnerregel“ besagt, dass es ein paar Euro kostet, in der Konstruktionsphase einige Striche zu ändern. Den laufenden Herstellungsprozess umzustellen, kostet hingegen ein Vielfaches davon (siehe Abbildung 4-41) [Bla-02]. Das Ziel der Methode ist es deshalb, die Risiken bzw. Schwachstellen einer Konstruktion so früh wie möglich zu erkennen, um noch rechtzeitig Verbesserungen durchführen zu können. Eine Kostenreduzierung in Erprobung, Fertigung und Kundendienst ist dadurch möglich.

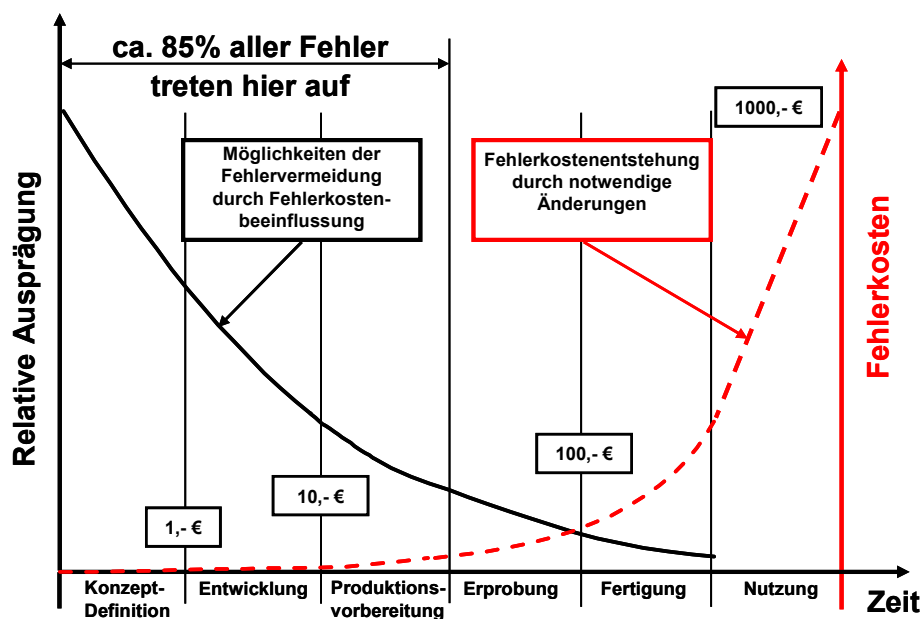


Abb. 4-41: Fehler und ihre Auswirkungen

Durch eine Risikoanalyse (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA) wird die FMEA durch das Quantifizieren von Ausfallauswirkungen, d.h. die Angabe von Ereignishäufigkeiten und der Schwere von Auswirkungen, ausgeweitet. Im vorliegenden Fall interessiert vor allem diese Quantifizierung der Ausfallhäufigkeit. Geschätzt werden kann die MTBF oder die Ausfallrate unter der Annahme einer Exponentialverteilung. Das bedeutet, dass mit dieser Schätzung bereits die Ausfallverteilung feststeht. Es existieren bereits auch Ansätze, die mit Hilfe der Schätzung mehrerer Parameter die Weibullverteilungsparameter bestimmen. Auf Grund der im Projektverlauf gemachten Erfahrungen, wird an dieser Stelle davon aber Abstand genommen.

In der Praxis wird aber meist nicht zwischen der FMEA und einer FMECA unterschieden, sondern generell der Begriff FMEA verwendet. FMEAs sind laufend zu pflegen, d.h. bei Änderung des Produktes bzw. Fertigungsverfahrens sind diese auf ihre Auswirkungen zu bewerten. Die systematische Erstellung von FMEAs bedeutet einen gewissen Aufwand, der aber durch die folgenden Vorteile deutlich aufgewogen wird [VDA-86]:

- Methodischer Zwang zur systematischen und vollständigen Erfassung potentieller Probleme zur Vermeidung von Fehlern in der Konstruktion und Fertigung.
- Reduzierung von Kosten und Zeit für nachträgliche Produktänderungen und erhöhten Prüfaufwand durch Fehlerverhütung in der Entwicklungs- und Planungsphase.
- Systematische Erfassung (Dokumentation) des Fach-Know-hows von Problemfeldern zur Vermeidung von Wiederholungsfehlern oder Doppelarbeit.

Durch die sehr formalisierte Vorgehensweise der FMEA wird sichergestellt, dass die Analyse systematisch und vollständig durchgeführt wird. Grundlage für eine FMEA ist ein standardisiertes FMEA-Formblatt, das eine klare Gliederung der Analyse vorgibt.

4.4.1.5 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation eignet sich gut für die Zuverlässigkeitsbetrachtung von Systemen, in denen die Zuverlässigkeitsverteilung der Komponenten bekannt ist. Genormt ist die Monte-Carlo-Simulation in dieser Anwendung in VDI Richtlinie 4008 [VDI-99]. Das Prinzip basiert auf der Ziehung vieler Zufallszahlen, die mit Hilfe der Verteilungsfunktion in virtuelle Fehlerzeiten umgerechnet werden können.

4.4.1.6 Datenquellen und Analysevorgehensweise

Wie gezeigt sind die datenbasierten Methoden gut für den Einsatz zur Zuverlässigkeitsanalyse geeignet insofern genügend valide Daten zur Verfügung stehen. Es gibt verschiedene mögliche Datenquellen für Ausfalldaten, die für die Berechnung des Ausfallverhaltens genutzt werden können. Um eine automatische Berechnung zu ermöglichen, müssen diese Datenquellen ihrer Qualität nach geordnet werden. Kriterien für die Qualität sind dabei hauptsächlich die möglichst komplette Erfassung aller Ausfälle und die Genauigkeit der Erfassung des Zeitpunktes des Ausfalls. In absteigender Reihenfolge sind das:

1. Instandhaltungsdaten
2. Serviceeinsätze
3. Betriebsdatenerfassung
4. Garantielieferungen
5. Ersatzteilverkäufe
6. Expertenwissen / FMEAs
7. Zuliefererangaben

Bei der Bestimmung des Ausfallverhaltens für eine Komponente wird dabei zunächst überprüft, ob eine Berechnung mittels Instandhaltungsdaten (bestmögliche Datenquelle) möglich ist. Ist dies nicht der Fall, werden die Datensätze in absteigender Reihenfolge ihrer Qualität nach ü-

berprüft; der „beste“ Datensatz, der eine Berechnung zulässt, wird dazu verwendet. Folgende Abbildung zeigt die Vorgehensweise.

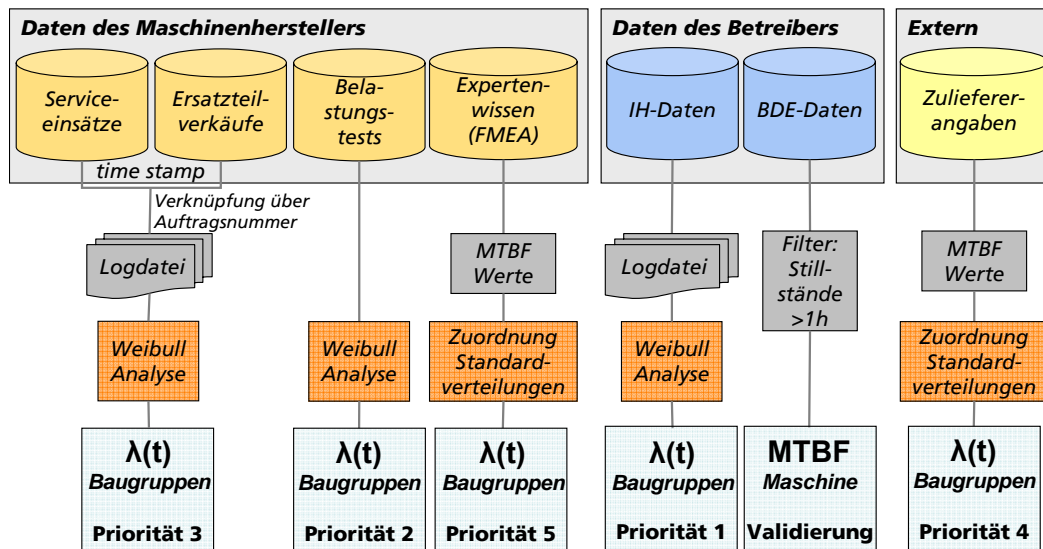


Abb. 4-42: Prinzip für die Berechnung des Ausfallverhaltens

4.4.2 Methodik zur Bestimmung der LCC-Elemente

Die hier beschriebene Methodik zur Bestimmung der LCC-Elemente deckt sich weitgehend mit der in der VDMA Richtlinie 34160 [VDM-05] beschriebenen Vorgehensweise, da diese wesentlich durch das vorliegende Projekt geprägt wurde.

Die einzelnen hier beschriebenen LCC-Elemente werden ausschließlich auf Maschinen- bzw. Anlagenebene erfasst, da sie zu einem großen Teil nicht auf Komponentenebene erfasst werden können.

In der Berechnung der LCC-Elemente werden drei Lebensphasen der Maschine unterschieden:

1. Die Entstehungsphase
2. Die Betriebsphase
3. Der Nachgebrauch

Die Berechnung der LCC in der in diesem Projekt entwickelten Software erfolgt nach dem VDMA Einheitsblatt [VDM-06]. Hier werden die Teile Instandhaltung sowie die geplante und ungeplante Instandsetzung der Betriebsphase gesondert betrachtet.

In den folgenden Tabellen werden einheitlich folgende Darstellungsgrundsätze verwendet:

1. Jedem LCC-Element ist ein Kürzel zugeordnet (1. Spalte), das die Darstellung der Formeln in Spalte 4 vereinfacht.
2. Spalte 2 beinhaltet jeweils den Namen des Elements, welcher durch eine kurze Beschreibung in Spalte 3 erläutert wird.
3. In Spalte 4 stehen die Berechnungsformeln. Die in einer Formel verwendeten Elemente stehen immer in den Zeilen unter der betreffenden Zeile. Der Ausdruck „Eingabe“ be-

deutet, dass dieser Wert nicht errechnet werden kann, sondern in die Software eingegeben werden muss.

4. In der letzten Spalte steht jeweils die für die Einheit, welche das Ergebnis der Berechnungsformel oder die Eingabe haben muss.

Die ungeplanten Instandsetzungskosten bilden die stochastischen Zuverlässigkeitskosten. Die Berechnung der einzelnen Eingabewerte wurde bereits beschrieben. Die Kosten werden allerdings nicht direkt nach den hier beschriebenen Vorschriften berechnet, sondern wie in folgenden Kapitel beschrieben simuliert.

4.4.2.1 Entstehungsphase

Die Entstehungsphase beinhaltet die Entstehungskosten einer Anlage oder Maschine, also alle Kosten, die bis zum Beginn der Betriebsphase anfallen. Dies beinhaltet insbesondere auch die für die Anlage notwendige Infrastruktur am Standort, sowie die Installations- und Inbetriebnahmekosten.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
E	Entstehungskosten	Beschaffungskosten und Infrastrukturkosten	$E1 + E2 + E3$	Währung
E1	Beschaffungskosten	Preis aller Entstehungsleistungen bis zum Produktionsbeginn	$E1.1 + E1.2 + E1.3 + E1.4 + E1.5 + E1.6$	Währung
E1.1	Anschaffungspreis	Preis der Maschine mit gesetzlicher Gewährleistung	Eingabe	Währung
E1.2	Werkzeugerstaustattung	Preis der Werkzeuge, die mit der Maschine beschafft werden.	Eingabe	Währung
E1.3	Ersatzteilpaket	Preis für Ersatzteile, die mit der Maschine beschafft werden.	Eingabe	Währung
E1.4	Garantieverlängerung	Preis für die Verlängerung der Garantie gemäß Anforderung. Negativ bei Garantieverkürzung.	Eingabe	Währung
E1.5	Installationskosten	Summe	$E1.5.1 + E1.5.2 + E1.5.3 + E1.5.4$	Währung
E1.5.1	Personalkosten Installation	Preis für das zur Installation benötigte Personal	Eingabe	Währung
E1.5.2	Reisekosten	Preis der Aufwendungen für die Reisen des Installationspersonals	Eingabe	Währung
E1.5.3	Gerätschaften	Preis oder Miete für Geräte, die zur Installation benötigt werden.	Eingabe	Währung
E1.5.4	Sonstige Installationskosten	Preis oder Mieten für sonstige Installationsleistungen	Eingabe	Währung
E1.6	Inbetriebnahmekosten	Summe	$E1.6.1 + E1.6.2 + E1.6.3 + E1.6.4 + E1.6.5 + E1.6.6$	Währung
E1.6.1	Personalkosten Inbetriebnahme	Preis für das zur Inbetriebnahme benötigte Personal	Eingabe	Währung
E1.6.2	Reisekosten	Preis der Aufwendungen für die Reisen des Inbetriebnahmepersonals	Eingabe	Währung

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
E1.6.3	Gerätschaften	Preis oder Miete für Geräte, die zur Inbetriebnahme benötigt werden. Z. B. Messmittel, Gabelstapler, Kräne.	Eingabe	Währung
E1.6.4	Werkzeug- und Verschleißteilkosten	Kosten für Werkzeuge und Verschleißteile während der Inbetriebnahme	Eingabe	Währung
E1.6.5	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe	Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe während der Inbetriebnahme	Eingabe	Währung
E1.6.6	Sonstige Inbetriebnahmekosten	Preis oder Mieten für sonstige Inbetriebnahmeleistungen	Eingabe	Währung
E1.7	Frachtkosten	Kosten zum Transport der Maschine zum Aufstellort	Eingabe	Währung
E1.8	Zollkosten	Kosten für Verzollung, Ein- und Ausfuhr	Eingabe	Währung
E1.9	Schulungskosten	Kosten zur Ersts Schulung des Bedienpersonals	Eingabe	Währung
E1.10	Sonstige Beschaffungskosten		Eingabe	Währung
E2	Infrastrukturkosten	Kosten zur Einrichtung des Aufstellorts und zur Einbindung der Maschine in die Umgebung	$E2.1+E2.2+E2.3+E2.4$	Währung
E2.1	Neu- und Umbaukosten	Kosten für Neu- und Umbauten insbesondere an Gebäuden und anderen Einrichtungen	Eingabe	Währung
E2.2	Versorgungs- und Entsorgungsnetzwerke	Kosten zur Anbindung an Versorgung und Entsorgung von Energie, Hilfsstoffen, Daten u. ä.	Eingabe	Währung
E2.3	Netzinfrastruktur	Kosten für die Erstellung von Versorgungs- und Entsorgungsnetzwerken, z. B. Aufbau von Druckluftversorgung	Eingabe	Währung
E2.4	Sonstige Infrastrukturkosten		Eingabe	Währung
E3	Sonstige Entstehungskosten		Eingabe	Währung

4.4.2.2 Betriebsphase

Die Betriebsphase beinhaltet die gesamten Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum. Zuerst werden die jährlichen Kosten des Betriebs ermittelt, aus welchen dann durch Multiplikation mit der Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums die gesamten Kosten über den Betrachtungszeitraum ermittelt werden. Die Berechnungsvorschriften für die Elemente Instandhaltung sowie geplante und ungeplante Instandsetzung werden in gesonderten Kapiteln angegeben.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
B	Gesamte Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum	Summe aller Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum	$B1 * D1$	Währung
B1	Gesamte Betriebskosten pro Jahr	Summe der Einzelkosten für den Betrieb und die Erhaltung der Funktionsfähigkeit pro Jahr	$IH1 + IH2 + IH3 + RK1 + MK1 + EK1 + HB1 + ES1 + PK1 + WK1 + RÜ1 + LK1 + SO1$	Währung

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
RK1	Raumkosten	Summe der Raumkosten für die Maschinen oder Komponente pro Jahr je betrachteter Maschine oder Komponente n	$\Sigma (RK1.1_n * RK1.3_n)$ oder alternativ $\Sigma (RK1.2_n * RK1.4_n)$	Währung
RK1.1 _n	Benötigte Fläche	Benötigte Fläche	Eingabe	m ²
RK1.2 _n	Benötigter Raum	Benötigter Raum	Eingabe	m ³
RK1.3 _n	Flächenkosten pro m ²	Kalkulierter Flächenkostensatz inklusive Miete, Heizung und Instandhaltung des Gebäudes	Eingabe	Währung/ m ²
RK1.4 _n	Raumkosten pro m ³	Kalkulierter Raumkostensatz inklusive Miete, Heizung und Instandhaltung des Gebäudes	Eingabe	Währung/ m ³
MK1	Materialkosten	Durchschnittliche Materialkosten pro Jahr je Material n	$\Sigma ((1/D3 * D6 * (MK1.1_n * MK1.3_n) + (D2 * MK1.2_n * MK1.3_n))$	Währung
MK1.1 _n	Materialverbrauch pro Stück	Durchschnittlicher Materialverbrauch je gefertigtes Produkt	Eingabe	Einheiten
MK1.2 _n	Materialverbrauch pro Betriebsstunde	Durchschnittlicher Materialverbrauch je Betriebsstunde	Eingabe	Einheiten
MK1.3 _n	Materialpreis / Einheit	Durchschnittlicher Materialpreis pro Einheit	Eingabe	Währung / Einheit
EK1	Energiekosten	Durchschnittliche Energiekosten der Maschinen im geplanten Belastungsmix mit n = 1 elektrischer Strom n = 2 Gas n = 3 Öl n = 4 Fernwärme n = 5 Kälte n = 6 Druckluft n > 6 weitere	$\Sigma ((1/D3 * D6 * (EK1.1_n * EK1.3_n) + (D2 * EK1.2_n * EK1.3_n))$	Währung
EK1.1 _n	Energieverbrauch pro Stück	Durchschnittlicher Energieverbrauch je gefertigtes Produkt	Eingabe	Einheiten
EK1.2 _n	Energieverbrauch pro Betriebsstunde	Durchschnittlicher Energieverbrauch je Betriebsstunde	Eingabe	Einheiten
EK1.3 _n	Energiepreis / Einheit	Durchschnittlicher Energiepreis pro Einheit	Eingabe	Währung / Einheit
HB1	Hilfs- und Betriebsstoffe	Durchschnittliche Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe im geplanten Belastungsmix je Hilfs- oder Betriebsstoff	$\Sigma ((1/D3 * D6 * (HB1.1_n * HB1.3_n) + (D2 * HB1.2_n * HB1.3_n))$	Währung
HB1.1 _n	Hilfs- und Betriebsstoffverbrauch pro Stück	Durchschnittlicher Hilfs- und Betriebsstoffverbrauch je gefertigtes Produkt	Eingabe	Einheiten
HB1.2 _n	Hilfs- und Betriebsstoffverbrauch pro Betriebsstunde	Durchschnittlicher Hilfs- und Betriebsstoffverbrauch je Betriebsstunde	Eingabe	Einheiten

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
HB1.3 _n	Hilfs- und Betriebsstoffpreis pro Einheit	Durchschnittlicher Hilfs- und Betriebsstoffpreis pro Einheit	Eingabe	Währung / Einheit
EN1	Entsorgungskosten	Durchschnittliche Entsorgungskosten im geplanten Belastungsmix je Materialart n	$\Sigma ((1/D3 * D6 * (EN1.1_n * EN1.3_n) + (D2 * EN1.2_n * EN1.3_n))$	Währung
EN1.1 _n	Entsorgungseinheiten pro Produkt pro Stück	Durchschnittliche Anzahl von Entsorgungseinheiten je gefertigtes Produkt	Eingabe	Einheiten
EN1.2 _n	Entsorgungseinheiten pro Betriebsstunde	Durchschnittliche Entsorgungseinheiten je Betriebsstunde	Eingabe	Einheiten
EN1.3 _n	Entsorgungskosten pro Einheit	Durchschnittlicher Entsorgungskosten pro Einheit	Eingabe	Währung / Einheit
PK1	Personalkosten	Durchschnittliche Personalkosten zum Betreiben der Maschine im Belastungsmix je Personalgruppe n	$\Sigma (D1*(PK1.1_n * PK1.3_n + PK1.2_n * PK1.4_n))$	Währung
PK1.1 _n	Personalaufwand Anbieter	Durchschnittlicher Aufwand zur Betreuung der Maschinen während der Produktion durch Personal des Anbieters pro Stunde	Eingabe	Stunden
PK1.2 _n	Personalaufwand Kunde	Durchschnittlicher Aufwand zur Betreuung der Maschinen während der Produktion durch Personal des Kunden pro Stunde	Eingabe	Stunden
PK1.3 _n	Stundensatz Anbieter	Durchschnittlicher Stundensatz für das Personal des Anbieters	Eingabe	Währung / Stunde
PK1.4 _n	Stundensatz Kunde	Durchschnittlicher Stundensatz für das Personal des Kunden	Eingabe	Währung / Stunde
WK1	Werkzeugkosten	Durchschnittliche Werkzeugkosten zum Betreiben der Maschine im Belastungsmix je Werkzeug n	$\Sigma (WK1.1_n * (WK1.2_n + WK1.3_n * WK1.4_n))$	Währung
WK1.1 _n	Anzahl Werkzeuge pro Jahr	Anzahl der benötigten Werkzeuge pro Jahr	Eingabe	Anzahl
WK1.2 _n	Anschaffungspreis	Durchschnittlicher Anschaffungspreis eines Werkzeugs	Eingabe	Währung
WK1.3 _n	Aufbereitungskosten	Durchschnittliche Aufbereitungskosten eines Werkzeugs	Eingabe	Währung
WK1.4 _n	Anzahl Aufbereitungen	Durchschnittliche Aufbereitungen pro Werkzeug und Jahr	Eingabe	Anzahl
RÜ1	Rüstkosten	Durchschnittliche Rüstkosten beim Betreiben der Maschine im Belastungsmix je Rüstvorgangart n	$\Sigma (RU1.1_n*(RU1.2_n * RU1.3_n + RU1.4_n * RU1.5_n + RU1.6_n))$	Währung
RU1.1 _n	Rüstvorgänge pro Jahr	Durchschnittliche Rüstvorgänge pro Jahr	Eingabe	Anzahl

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
RU1.2 _n	Personalaufwand Anbieter	Durchschnittlicher Personalaufwand des Anbieters zum Umrüsten der Maschine	Eingabe	Stunden
RU1.3 _n	Personalaufwand Kunde	Durchschnittlicher Personalaufwand des Kunden zum Umrüsten der Maschine	Eingabe	Stunden
RU1.4 _n	Stundensatz Anbieter	Durchschnittlicher Stundensatz des Anbieters	Eingabe	Währung / Stunde
RU1.5 _n	Stundensatz Kunde	Durchschnittlicher Stundensatz des Kunden	Eingabe	Währung / Stunde
RU1.6 _n	weitere Kosten	Durchschnittliche weitere Kosten für die Umrüstung, wie z. B. Material, Prüfling usw.	Eingabe	Währung
LK1	Lagerkosten	Durchschnittliche Lagerkosten für Werkzeuge, Ersatzteile usw. pro Jahr je Teil und Lagerort n	$\Sigma (LK1.1 * (LK1.2_n + LK1.3_n))$	Währung
LK1.1 _n	Anzahl Lagerplätze	Durchschnittliche Anzahl von Lagerplätzen, die pro Jahr benötigt werden	Eingabe	Anzahl
LK1.2 _n	Lagerkostensatz pro Lagerplatz des Anbieters	Durchschnittlicher Lagerkostensatz pro Lagerplatz, wenn das Teil beim Anbieter oder in einem Konsignationslager, welches ein Lager des Lieferanten oder eines Dienstleisters in dem Unternehmen des Abnehmers ist, gelagert wird	Eingabe	Währung
LK1.3 _n	Lagerkostensatz pro Lagerplatz des Kunden	Durchschnittlicher Lagerkostensatz pro Lagerplatz beim Kunden	Eingabe	Währung
SO1	Sonstige Betriebskosten	Sonstige jährliche Betriebskosten	Eingabe	Währung

4.4.2.3 Instandhaltung

Die Instandhaltung beinhaltet hier die Bereiche Wartung und Inspektion. Instandhaltung allgemein bezeichnet die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“ [DIN-01, S.8] Wartung bezeichnet alle „Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats“ [DIN-03, S.4], Inspektion alle „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung“ [DIN-03, S.4]. Das heißt, Instandhaltung als Kombination von Wartung und Inspektion beinhaltet hier nicht die Rückführung in den funktionsfähigen Zustand, wie in der allgemeinen Definition. Dies beinhalten die Punkte geplante und ungeplante Instandsetzung.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
IH1	Wartung & Inspektion	Summe aller Einzelkosten pro Jahr, die zur Wartung und Inspektion der Maschine notwendig sind, im nachfolgenden mit Wartung bezeichnet und je Wartungsvorgang n darstellbar.	$\Sigma (IH1.1_n * (IH1.2_n * IH1.6_n + IH1.2_n * IH1.7_n + IH1.3_n + IH1.4_n * IH1.5_n))$ oder Pauschale	Währung
IH1.1 _n	Häufigkeit der Wartung	Häufigkeit dieses Wartungsvorgangs pro Jahr, entweder in Abhängigkeit der Betriebsstunden oder in festen Zeitintervallen	Eingabe	Anzahl
IH1.2 _n	Arbeitsaufwand pro Wartungsvorgang	Durchschnittlicher Zeitaufwand für diesen Wartungsvorgang	Eingabe	Stunden
IH1.3 _n	Materialaufwand pro Wartungsvorgang	Durchschnittlicher Materialaufwand für diesen Wartungsvorgang	Eingabe	Währung
IH1.4 _n	Messsystem- Einsatzzeit pro Wartungsvorgang	Durchschnittlicher Messsystem-Zeitaufwand für diesen Wartungsvorgang	Eingabe	Stunden
IH1.5 _n	Messsystem- Stundensatz	Stundensatz des Messsystems für diesen Wartungsvorgang	Eingabe	Stunden
IH1.6 _n	Stundensatz des Wartungspersonals des Anbieters	Stundensatz des Wartungspersonals des Anbieters	Eingabe	Währung
IH1.7 _n	Stundensatz des Wartungspersonals des Kunden	Stundensatz des Wartungspersonals des Kunden	Eingabe	Währung

4.4.2.4 Instandsetzung geplant

Instandsetzung allgemein bezeichnet alle „Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand, mit Ausnahme von Verbesserungen“ [DIN-03, S.5]. Die geplante Instandsetzung beinhaltet dabei nur die Instandsetzungsarbeiten, die geplant, also zu einem selbst gewählten Zeitpunkt geschehen. Dies ist dann möglich, wenn ein Ausfall in absehbar ist, etwa durch Abnutzung eines Teils, welches dann geplant z.B. in Arbeitspausen ausgetauscht oder repariert werden kann.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
IH2	Instandsetzung	Summe aller Einzelkosten pro Jahr, die zur geplanten Instandhaltung der Maschine notwendig sind, dargestellt je Instandhaltungsvorgang n.	$\Sigma (IH2.1_n * (IH2.2_n * IH2.6_n + IH2.2_n * IH2.7_n + IH2.3_n + IH2.4_n * IH2.5_n))$ oder Pauschale	Währung
IH2.1 _n	Häufigkeit	Häufigkeit dieses geplanten Instandsetzungsvorgangs pro Jahr, entweder in Abhängigkeit der Betriebsstunden oder in festen Zeitintervallen	Eingabe	Anzahl

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
IH2.2 _n	Arbeitsaufwand pro geplanten Instandsetzungs- vorgang	Durchschnittlicher Zeitaufwand für diesen geplanten Instandsetzungs- vorgang	Eingabe	Stunden
IH2.3 _n	Materialaufwand pro geplanten Instandsetzungsvorgang	Durchschnittlicher Materialaufwand für diesen geplanten Instandsetzungs- vorgang	Eingabe	Währung
IH2.4 _n	Messsystem- Einsatzzeit pro geplanten In- standsetzungsvorgang	Durchschnittlicher Messsystem- Zeitaufwand für diesen geplanten Instandsetzungsvorgang	Eingabe	Stunden
IH2.5 _n	Messsystem- Stundensatz	Stundensatz des Messsystems für diesen geplanten Instandsetzungs- vorgang	Eingabe	Stunden
IH2.6 _n	Stundensatz des Instandsetzungs- personals des Anbieters	Stundensatz des Instandsetzungs- personals des Anbieters	Eingabe	Währung
IH2.7 _n	Stundensatz des Instandsetzungs- personals des Kunden	Stundensatz des Instandsetzungs- personals des Kunden	Eingabe	Währung

4.4.2.5 Instandsetzung ungeplant

Die ungeplante Instandsetzung beinhaltet die Instandsetzung von Teilen, deren Ausfälle zufällig geschehen und deren Instandsetzung sich daher nicht planen lässt. Die Berechnung dieser Kosten ist Grundlage der Zuverlässigkeitsanalyse und wird daher nicht in diesem Bereich durchgeführt. Der Vollständigkeit halber seien aber die Berechnungsvorschriften hier aufgeführt.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
IH3	Ungeplante Instandsetzung	Summe aller Einzelkosten pro Jahr, die zur ungeplanten Instandhaltung der Maschine notwendig sind, dargestellt je Maschinenkomponente n.	$\Sigma (D2/IH3.1_n * (IH3.2_n * IH3.6_n + IH3.2_n * IH3.7_n + IH3.3_n + IH3.4_n * IH3.5_n))$ oder Pauschale	
IH3.1 _n	Mittlere Ausfallhäufigkeit [MTBF]	Mittlere Ausfallhäufigkeit eines Bauteils, einer Komponente oder Baugruppe	Berechnung durch Software	Stunden
IH3.2 _n	Arbeitsaufwand pro ungeplanten Instandsetzungs- vorgang	Durchschnittlicher Zeitaufwand für diesen geplanten Instandsetzungs- vorgang	Berechnung der Software	Stunden
IH3.3 _n	Materialaufwand pro ungeplanten Instandsetzungsvor- gang	Durchschnittlicher Materialaufwand für diesen ungeplanten Instandsetzungs- vorgang	Eingabe	Währung
IH3.4 _n	Messsystem- Einsatzzeit pro ungeplanten Instandsetzungsvorgang	Durchschnittlicher Messsystem- Zeitaufwand für diesen geplanten Instandsetzungsvorgang	Berechnung der Software	Stunden

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
IH3.5 _n	Messsystem-Stundensatz	Stundensatz des Messsystems für diesen ungeplanten Instandsetzungsvorgang	Eingabe	Währung
IH3.6 _n	Stundensatz des Instandsetzungspersonals des Anbieters	Stundensatz des Instandsetzungspersonals des Anbieters	Eingabe	Währung
IH3.7 _n	Stundensatz des Instandsetzungspersonals des Kunden	Stundensatz des Instandsetzungspersonals des Kunden	Eingabe	Währung
IH3.8 _n	Mittlere Reparaturdauer [MTTR]	Durchschnittliche Zeit vom Ausfall bis zur Wiederinbetriebnahme des Bauteils, einer Komponente oder Baugruppe	Eingabe	Stunden

4.4.2.6 Verwertungsphase

Die Verwertungsphase schließt sich an die Betriebsphase an. Sie beinhaltet die Kosten, die durch die Beendigung der Nutzung entstehen.

Kürzel	Name	Beschreibung	Berechnungsformel	Einheit
V	Verwertungskosten	Kosten zum Rückbau und gegebenenfalls Erlöse aus Restwert oder Verkauf	$V1 + V2 + V3$	
V1	Rückbau	Kosten für den Rückbau	$V1.1. + V1.2 + V1.3 + V1.4 + V1.5$	
V1.1	Demontage und Außerbetriebnahme	Kosten zur Demontage und Außerbetriebnahme	Eingabe	Währung
V1.2	Logistikkosten	Kosten zum Abtransport der Maschine	Eingabe	Währung
V1.3	Verschrottungskosten	Kosten zur Verschrottung der Maschine	Eingabe	Währung
V1.4	Entsorgungskosten	Kosten zur Entsorgung von Material, Hilfs- und Betriebsstoffen, Werkzeugen, usw.	Eingabe	Währung
V1.5	Sanierung	Kosten für Rückbau und Sanierung der Infrastruktur, z. B. Gebäude, Grundstücke	Eingabe	Währung
V2	Restwert	Restwert oder potentieller Preis am Ende des Betrachtungszeitraums	Eingabe	Währung
V3	Sonstige Verwertungskosten	Sonstige Kosten und Erlöse der Verwertung	Eingabe	Währung

4.5 Risikobewertung und -prognose (AP5)

In diesem Kapitel wird das entwickelte Modell zur Risikobewertung und -prognose von LCC-Verträgen vorgestellt. Dieses Modell orientiert sich einerseits am Prozess der operativen Angebotserstellung im Maschinen- und Anlagenbau, andererseits an den beschriebenen Methoden des Risikomanagements, welche im Folgenden auf ihre Eignung für eine risikobewusste Analyse von Kosten aus LCC-Verträgen untersucht werden.

Bevor die konkreten Anforderungen an ein geeignetes Risikomanagementsystem hergeleitet werden, wird zunächst die Bedeutung von Garantierisiken im Maschinen- und Anlagenbau mit Hilfe einer Umfrage unter 8 Werkzeugmaschinenherstellern geklärt.

4.5.1 Relevanz der Risiken aus LCC-Verträgen

Die Abwicklung eines Produktionsauftrags im Maschinen- und Anlagenbau ist in hohem Maße mit Risiken behaftet, welche über Erfolg oder Misserfolg des Projekts entscheiden können. In allen Projektphasen bestehen Risiken, die sich sowohl qualitativ als auch in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und dem erwarteten Schadensausmaß unterscheiden. Um diese Risiken in einem ersten Schritt zu identifizieren, bietet sich eine Strukturierung der Risiken anhand der einzelnen Projektphasen an. Angelehnt an DIN-62198 lassen sich in den einzelnen Projektphasen folgende Risiken identifizieren:

Entwurf und Entwicklung:	Konstruktionsfehler, Patentverletzungen
Fertigung:	Qualitätsprobleme, Streik
Inbetriebnahme:	Verweigerung der Abnahme, Transportschäden
Verkaufsabwicklung:	Konventionalstrafen, verspätete Zahlung, Wechselkursänderungen
Betrieb und Instandhaltung:	Produkthaftung, Gewährleistungskosten, Kosten aus LCC-Verträgen

4.5.2 Risiken von LCC-Verträgen

Die Risiken von LCC-Verträgen ergeben sich zum einen aus dem stochastischen Ausfallverhalten der Maschinen und Anlagen, zum anderen aus der schwierigen Prognose des Ausfallverhaltens, der Instandhaltbarkeit und der Ersatzteilkosten, welche bei Abschluss des Vertrags vom Hersteller geleistet werden muss. Diese Größen hängen wiederum von den jeweiligen Betriebsbedingungen des Kunden ab und können vom Hersteller nur schwer eingeschätzt werden. Die Risiken von LCC-Verträgen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Statistische Schwankung des Ausfallverhaltens
- Ungenaue Prognose des Ausfallverhaltens
- Statistische Schwankung der Reparaturzeiten
- Preissteigerung der Ersatzteile
- Einfluss der Belastung (Betriebsbedingungen) auf das Ausfallverhalten

- Ausfälle durch falsche Bedienung

4.5.3 Anforderungen an ein Risikomanagementsystem

Mit dem Verkauf eines LCC-garantiebehafteten Produkts geht der Hersteller Risiken ein, die es bereits bei der Angebotserstellung zu bewerten, bei der Preisgestaltung zu berücksichtigen und nach dem Verkauf zu überblicken gilt. Daher muss ein unterstützendes Risikomanagementsystem zu einem der Phasen des Risikomanagements, zum anderen den spezifischen Anforderungen des Angebotsprozesses gerecht werden.

Risikoidentifikation

Die Größe, die in entscheidendem Maß die LCC-Garantiekosten beeinflusst, ist die Produktzuverlässigkeit. Da sich die Produktzuverlässigkeit bei einem komplexen Produkt, wie es hier angenommen wird, aus der Zuverlässigkeit seiner Komponenten ergibt, sind im Sinne einer Risikoidentifikation diejenigen Komponenten zu identifizieren, welche die Garantiekosten beeinflussen. Dabei sind die Zuverlässigkeit der Komponenten und die bei einem Ausfall entstehenden Kosten möglichst genau zu beschreiben. Ein Risikomanagementsystem muss also schon bei der Zuverlässigkeitsanalyse ansetzen. Demnach ist hier eine Schnittstelle zu den Daten aus internen Zuverlässigkeitsversuchen oder auch Felddaten zu schaffen.

Risikobewertung

Für die Quantifizierung des Risikos zukünftiger Garantieleistungen eignen sich in besonderem Maße die Value-at-Risk-basierten Methoden. Sie wurden entwickelt, um die Wertänderungen eines Portfolios risikobehafteter Positionen zu bestimmen. Das mit einer Garantie verkaufte Produkt kann gewissermaßen als Portfolio von risikobehafteten, da nur bedingt zuverlässigen Komponenten aufgefasst werden. Als Zielgröße sind nun die innerhalb der LCC-Garantie entstehenden Kosten anzusehen, welche sich als Summe aller Reparatur- und Ersatzteilkosten ergeben. Diese Kosten müssen nun gemäß dem VaR Ansatz als eine stochastisch verteilte Zufallsgröße formuliert werden. Es besteht folgende Analogie zwischen der Risikobewertung eines Wertpapierportfolios und der Risikobewertung einer LCC-Garantieleistung:

	Portfoliorisiko	Garantierisiko
Zielgröße	Wertänderung des Portfolios	Garantiekosten
Risikofaktoren	Basiswertpapiere	Technische Komponenten
Risikofaktor-änderungen	Wertänderung der Basiswertpapiere	Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten
Sensitivitäten	Wertmäßiger Anteil der Wertpapiere am Portfolio	Reparatur- und Materialkosten der einzelnen Komponenten
Zielfunktion der Zielgröße	$\Delta P = \sum_{i=1}^N s_i \Delta R_i$	$C = \sum_{i=1}^N c_i M_i$

Abb. 4-43: Analogie zwischen dem Risiko eines Wertpapierportfolios und dem Garantierisiko eines technischen Produkts. M_i drückt die Zuverlässigkeit aus und bezeichnet die Anzahl der Ausfälle von Komponente i als Zufallsvariable, c_i die bei einem Ausfall anfallenden Reparaturkosten. R_i : Risikofaktor i ; s_i : Sensitivität des Risikofaktors i .

Vor allem in der strukturellen Übereinstimmung der Zielgrößenfunktionen wird die starke Analogie zwischen dem Risiko eines Wertpapierportfolios und dem Garantierisiko deutlich. Damit liegt es nahe, für das Risikomanagement von Garantien ein VaR-basiertes Verfahren auszuwählen. Dazu sind die Risikofaktoränderungen in Form des Ausfallverhaltens der relevanten Komponenten (M_i) sowie die Sensitivitäten in Form von Reparatur- bzw. Materialkosten (c_i) zu bestimmen.

Angebotserstellungsprozess

Der Angebotserstellungsprozess stellt zusätzliche Anforderungen an das Risikomanagement Tool. So ist im Sinne einer effizienten Angebotserstellung darauf zu achten, dass das Tool auf die Kenntnisse und Bedürfnisse der entsprechenden Abteilung zugeschnitten ist. In der Regel ist dies der technische Vertrieb. Die Aufgabe des Vertriebsmitarbeiters im Rahmen des Risikomanagements ist es nun, das Risikoportfolio zusammenzustellen, das es zu bewerten gilt. Da die Risikofaktoren im betrachteten Fall mit den Komponenten des Produkts übereinstimmen, geht dieser Schritt mit der Beschreibung bzw. Konfiguration des Produkts einher. Daher soll die Konfiguration durch das Risikomanagementsystem soweit wie möglich unterstützt werden.

Die systemseitigen Anforderungen an das Tool werden also von den Schritten des Risikomanagementprozesses, die anwendungsseitigen Anforderungen vom Angebotserstellungsprozess bestimmt. Die folgende Abbildung fasst die Anforderungen in einer Übersicht zusammen.

Prozessschritt	Anforderungen
Risikoidentifikation	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittstelle zu Daten aus Zuverlässigkeitstests, Feld- oder Garantiedaten • Zuverlässigkeitsanalyse
Risikobewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Reparaturkostenbestimmung der Komponenten • Implementierung eines VaR-Verfahrens
Risikosteuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Ergebnisse aus der Risikobewertung • Szenarioanalysen
Risikoüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> • Aggregation der Risiken mehrerer Verträge • Schnittstelle zu den Systemen der Kostenrechnung und Finanzplanung
Angebotserstellungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> • Bedienbarkeit für Vertriebsmitarbeiter • Produktkonfiguration

Abb. 4-44: Zusammenfassung der Anforderungen an ein Risikomanagementsystem

4.5.4 Modell zur Risikobewertung

Bewertungsverfahren basieren im Allgemeinen auf Modellen und den mit ihnen verbundenen Annahmen. Im Folgenden werden daher zunächst die Annahmen für das Risikobewertungsmodell festgelegt, auf deren Basis im nächsten Schritt ein VaR-basiertes Verfahren für die Risikobewertung herzuleiten ist.

Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass es sich um eine aus mehreren Komponenten bestehende Maschine handelt, die in einer hierarchischen Baumstruktur darstellbar ist. Es wird weiterhin angenommen, dass in die LCC-Garantiekosten ausschließlich die im Lebenszyklus anfallenden Instandsetzungskosten einfließen. Die Kosten einer Instandsetzungsmaßnahme gliedern sich in Reparaturkosten und Materialkosten für Ersatzteile (EK) etc. Die Reparaturkosten für jede Komponente bestimmen sich aus einem für alle Komponenten geltenden Stundensatz (c) sowie der komponentenspezifischen Reparaturdauer $MTTR$. Damit lassen sich die Kosten einer Instandhaltungsmaßnahme einer Komponente wie folgt schreiben:

$$IK_i = c \cdot MTTR_i + EK_i \quad (4-19)$$

Die maximalen Kosten entstehen bei einer Free-Replacement Warranty (FRW), die sich über den gesamten Lebenszyklus erstreckt. Daher sollen zunächst diese Kosten ermittelt werden. Im Anschluss können entsprechend andere Garantien so modelliert werden, dass eine Aufteilung dieser Kosten auf Hersteller und Kunden erfolgt. Die Gesamtkosten ergeben sich nun, indem die Instandhaltungskosten mit der Anzahl der Ausfälle multipliziert werden. Die Anzahl der Ausfälle ist im Sinne einer VaR-Berechnung eine Zufallsgröße sein, sodass auch die Gesamtkosten der FRW eine Zufallsgröße sind und hierzu ein Wahrscheinlichkeitsprofil erstellt werden kann. Wie diese Zufallsgröße ermittelt wird, hängt von nun von der Wahl der VaR Verfahrens ab.

Der historische Ansatz versucht, eine empirische Verteilungsfunktion für die Zielgröße, in diesem Falle die totalen Instandhaltungskosten, auf der Basis historischer Realisierungen bestim-

men. Im vorliegenden Fall sind diese Kosten anders als etwa Aktienkurse schwer in ausreichender Anzahl beobachtbar, da sie in die Verantwortungsbereiche verschiedener Kunden fallen. Hinzu kommt, dass die zu betrachtende Maschine ein individuell für den Kunden zugeschnittenes Produkt ist, sodass unter Umständen keine historischen Daten für dieses Produkt vorliegen. Weiterhin sind LCC-Verträge im Maschinen- und Anlagenbau relativ neu, sodass bisher wenige Erfahrungswerte vorliegen.

Der Varianz-Kovarianz Ansatz geht von einer Diversifikation des unsystematischen Risikos der Faktoren aus, d.h. es wird nur das systematische Risiko aus den Kovarianzen betrachtet und damit eine Abhängigkeit der Risikofaktoren unterstellt. Eine Abhängigkeit des Ausfallverhaltens verschiedener in einer Maschine interagierender Komponenten liegt zwar nahe, ist jedoch nur mit Hilfe einer äußerst großen Datenbasis bezifferbar. Im hier vorliegenden Modell wird daher angenommen, dass das Ausfallverhalten der Maschinenkomponenten unabhängig voneinander ist. Weiterhin setzt der Ansatz eine Normalverteilung der Risikofaktoränderungen und daher auch der Zielgröße voraus. Auch diese Annahme trifft im hier betrachteten Fall nicht zu. Das Ausfallverhalten der Komponenten (Risikofaktoren) ist weibullverteilt. Daher ist dieser Ansatz nicht anwendbar.

Der Monte-Carlo (MC) Ansatz eignet sich dagegen aus mehreren Gründen. Zum einen wird bei dieser Methode keine Einschränkung bezüglich Verteilung der Faktoränderungen gemacht. Das hier angenommene weibullverteilte Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten kann also ohne weiteres simuliert werden. Die Methode eignet sich weiterhin nicht nur zur VaR-Berechnung, sondern auch zur Simulation des Ausfallverhaltens eines technischen Systems. Im vorliegenden Fall ist das Gesamtausfallverhalten des Systems direkt an die Garantiekosten gekoppelt, sodass beim Einsatz dieser Methode sowohl die technische Zuverlässigkeit (z.B. in Form der Verfügbarkeit), als auch ein Risikoprofil der Zielgröße berechnet werden kann. Ein weiterer Vorteil der Methode ist die große Flexibilität, vor allem die Fähigkeit zur dynamischen Modellierung, welche im Folgenden auch genutzt wird.

Die Idee ist es nun, das Ausfallverhalten der Maschine über den gesamten Lebenszyklus zu simulieren. Grundlage sind dabei zufällige Ausfälle der einzelnen Komponenten. Durch eine anschließende Bewertung der simulierten Systemausfälle nach der oben hergeleiteten Formel für die Instandsetzungen einer Komponente, kann ein Kostenbetrag bestimmt werden. Nach dem Prinzip der MC-Methode wird dieses Vorgehen genügend häufig wiederholt, sodass eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Zielgröße ermittelt werden kann. Durch den dynamischen Charakter dieses Vorgehens ist eine gleichzeitige Simulation der Kostenaufteilung nach dem vorgestellten TCO-Vertrag möglich. Die Kostenaufteilung beruht auf der Betrachtung jedes aktuellen Systemausfalls in seinem zeitlichen Kontext und den damit verbundenen Kosten. Daher ist es unumgänglich, nicht lediglich die Anzahl der Systemausfälle, sondern das Ausfallverhalten in seinem zeitlichen Verlauf zu modellieren. Aus dem Ereignis- und Zeitorientierten Prinzip ergeben sich weitere Erweiterungsmöglichkeiten des Grundmodells.

Das grundsätzliche Prinzip der Simulation ist es also, zunächst aus der Verteilung der Ausfallzeiten einer Komponente eine Menge an zufälligen Ausfallzeitpunkten zu generieren. Diesen simulierten Ausfällen müssen Kosten zugeordnet werden, welche kumuliert über den Lebenszyklus T die reparaturbedingten LCC, bzw. nach den Modellannahmen die Kosten einer FRW ergeben:

4.5.5 Daten- und Funktionsmodell

Nachdem die grundlegenden Modellannahmen und das Vorgehen zur Risikobewertung ausgewählt und spezifiziert worden sind, sollen in diesem Abschnitt die konkreten Funktionen und die zu verwendenden Ein- und Ausgangsdaten des Risikomanagement Tools erarbeitet werden.

Grundlage zur Risikobewertung einer konkreten LCC-Garantie ist eine Datentabelle, in der alle relevanten Komponenten des Produkts enthalten sind. Sie enthält die für die Bewertung wichtigen Größen MTTR, Ersatzteilkosten, sowie die Weibullparameter zur Charakterisierung des Ausfallverhaltens. Die Tabelle kann kontinuierlich durch die Analyse von Felddaten oder freie Eingabe durch den Benutzer verändert bzw. erweitert werden.

Ausgehend von dieser Datenbasis stellt der Benutzer im Angebotsprozess das entsprechende Produkt zusammen (Konfiguration). Mit der Monte-Carlo Simulation wird nun der Lebenszyklus des gesamten Produkts simuliert. Die hinterlegten Regeln, fließen in die Bewertung des simulierten Ausfallverhaltens ein. Ausgehend von verschiedenen Auswertungen der Kosten kann der Benutzer in einer Sensitivitätsanalyse gezielt die Angaben im LCC-Vertrag ändern und die Auswirkung auf die Kosten analysieren.

4.6 Erstellung des Softwareprototypen (AP6)

Siehe Softwareprototyp (downloadbar).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführte Praxisstudie mit Fragebögen, Interviews und Workshops hat gezeigt, dass das Thema Life-Cycle-Costing zunehmend an Bedeutung gewinnt. Viele Käufer von Produktionsmaschinen sind immer noch in der Pilotphase mit ihren LCC-Konzepten, so dass die Komplexität auf Grund der vielen unterschiedlichen Konzepte noch stark steigen wird. Es ist also in Zukunft mit einem erhöhten administrativen Aufwand seitens der Maschinenhersteller zu rechnen. Die LCC-Verträge, in denen definierte LCC Kostenelemente vom Hersteller garantiert werden müssen, werden zudem auch als immenses finanzielles Risiko wahrgenommen. Dabei ist bemerkenswert, dass von den konfrontierten Unternehmen sowohl die Risikohöhe in Form von erwarteten Kosten, als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit als hoch im Vergleich zu anderen Projektrisiken eingeschätzt werden. Betrachtet man das Risiko aus LCC-Verträgen näher im Detail, so zeigt sich, dass vor allem das stochastische Verhalten der Zuverlässigkeit und Reparatur als Risiko wahrgenommen wird. Daneben steht das Problem der Berechenbarkeit unter Berücksichtigung der jeweiligen Belastung im Vordergrund. Um dem zu begegnen ist es also erforderlich anwendbare Methoden für die stochastische Berechnung der Zuverlässigkeit bereitzustellen. Darüber hinaus gilt es die bestehenden Risiken quantifizierbar zu machen, um die Verhandlung in der Angebotsphase transparenter zu machen.

Trotz der bestehenden Normen und Richtlinien war es erforderlich die Lebenszykluskostenelemente neu zu strukturieren, da die bisherigen Standards aus Sicht der Betreiber und Käufer aufgesetzt wurden. Die Zusammenarbeit mit dem LCC-Arbeitskreis des VDMA bot eine sehr gute Möglichkeit die Arbeitsergebnisse direkt in einen Standard (VDMA Einheitsblatt 34160), der die Sicht des Maschinen- und Anlagenbaus vertritt, einfließen zu lassen. Heute steht damit eine bereits vielfach zitierte Richtlinie für die Berechnung von Lebenszykluskostenelementen zur Verfügung.

Gemäß den oben beschriebenen Anforderungen ist das Ergebnis des Projekts ViLMA eine Methodik für den Umgang mit Risiken aus LCC-Verträgen in der Angebotsphase. Der erste Schritt ist die stochastische Berechnung der Zuverlässigkeit. In Kapitel 4 wurden hierzu bereits einige im Projekt entwickelte Methoden vorgestellt. Auf Grund der vorliegenden Normung (DIN IEC 61649) empfiehlt sich die Anwendung der Weibull-Analyse insofern ausreichend valide Daten vorliegen. Die Annahme der Weibullverteilung sollte aus wissenschaftlicher Sicht über entsprechende Anpassungstests (z.B. Kolmogorov-Smirnov-Test) bestätigt werden. Die unternehmerische Praxis zeigt aber, dass die Ergebnisse in der Regel auch ohne Test verwendet werden, da sie dennoch das bestmögliche Ergebnis darstellen. Zur Reduktion der benötigten Datenmenge kann beispielsweise der Ansatz von Weibayes verwendet werden. Reicht die Datengrundlage dennoch nicht aus, um die einzelnen Maschinenkomponenten mit der Weibull-Analyse zu untersuchen, so bietet sich die FMECA als Strukturierungshilfsmittel für die Abschätzung der Zuverlässigkeit an. Da die Schätzung in der Regel konservativ ist, wird die Zuverlässigkeit normalerweise unterschätzt und damit die Kosten überschätzt [vgl. Der-06].

Neben der Bestimmung der Zuverlässigkeit gilt es die weiteren Lebenszykluskosten zu berechnen. In den heutigen Vertragswerken sind zwar zumeist nur wenige LCC-Elemente neben den Instandhaltungskosten, die hauptsächlich durch die Zuverlässigkeit bestimmt werden, gefragt, dennoch sollte eine generische Methodik diese Erweiterungsmöglichkeit vorsehen. Für die Details der Berechnung wird auf die VDMA Richtlinie 34160 verwiesen. Die LCC-Elemente fließen auf Grund ihrer untergeordneten Bedeutung als deterministische Größen in die weitere Berechnung mit ein.

Für die Kombination der stochastischen und deterministischen Elemente ist die Monte-Carlo-Simulation die Methode der Wahl. Ihre Flexibilität hinsichtlich der Erweiterbarkeit und ihre Einfachheit sind die schlagenden Argumente, während die Nachteile der langsamen Konvergenz auf Grund der verfügbaren Rechnerleistungen zu vernachlässigen sind. Das Ergebnis sind virtuelle LCC-Kostenverläufe über den gesamten Lebenszyklus. Aus ihnen kann eine Vielzahl an Auswertungen erfolgen.

Aus der berechneten Verteilungsfunktion der Zuverlässigkeit für die einzelnen Maschinenkomponenten kann über die Bestimmung der vom Hersteller zu tragenden Ausfallwahrscheinlichkeit (Garantiewahrscheinlichkeit) das Angebot mit LCC-Elementen und MTBF-Werten bestimmt werden. Eine Sensitivitätsanalyse der Angebotsparameter auf die LCC-Kosten des Herstellers ermöglicht die optimale Anpassung der Angebotsparameter auf den jeweiligen Kunden. Zudem wird die Transparenz erhöht.

Der Umgang mit den Risiken aus LCC-Verträgen ist mit der entwickelten Methodik möglich. Die Erhöhung der Risikotransparenz schafft ein Bewusstsein für die Probleme sowohl auf Käufer-, als auch auf Verkäuferseite. Es stellt sich daraus aber die Frage nach dem nächsten Entwicklungsschritt nach LCC. Bei den Kunden des Maschinen- und Anlagenbaus setzt sich der Trend zu einer Reduktion der Fixkosten fort. Auch die Instandhaltungsabteilungen sind hiervon betroffen. In der Praxis sind bereits einige erweiterte Servicemodelle und Betreibermodelle mit unterschiedlichem Erfolg untersucht worden. Es zeigt sich aber, dass die Maschinenhersteller mehr und mehr After-Sales-Aufgaben übernehmen sollen. Auf Grund der weiterhin zunehmend global ausgerichteten Produktion müssen Maschinenhersteller diese Leistung auch dezentral erbringen. Dies führt dazu, dass zunehmend mehr globale Servicenetzwerke von kleinen und mittelständischen Unternehmen aufgebaut werden müssen. Auf Basis der im Bereich LCC erarbeiteten Methoden gilt es also nun Vorgehensweisen für den Entwurf und die Steuerung von Servicenetzwerken zu entwickeln.

6 Anhang

6.1 Abkürzungen

DIN	-	Deutsches Institut für Normung
ETK	-	Ersatzteilkosten
FMEA	-	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	-	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FRW	-	Free Replacement Warranty
IH	-	Instandhaltung
KSS	-	Kühl- und Schmierstoff
LCC	-	Life Cycle Costing
LZK	-	Lebenszykluskosten
MCRP	-	Mean Cost of Replacement Parts
MFU	-	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
MTBE	-	Mean Time Between Events
MTBF	-	Mean Time Between Failure
MTTPM	-	Mean Time To Preventive Maintenance
MTTR	-	Mean Time To Repair
RHB	-	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe
RIW	-	Reliability Improvement Warranty
TCO	-	Total Cost of Ownership
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	-	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

6.2 Veröffentlichungen

- [Fle-07] Fleischer, J.; Nigggeschmidt, S.; Wawerla, M.: Optimizing the Life-Cycle-Performance of Machine Tools by Reliability and Availability Prognosis. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, 2007.
- [Fle-07a] Fleischer, J.; Wawerla, M.; Nigggeschmidt, S.: Machine Life Cycle Cost Estimation via Monte-Carlo Simulation. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, 2007.
- [Fle-07b] Fleischer, J.; Wawerla, M.: Risk Management of Warranty Cost Contracts. The 2007 International Applied Reliability Symposium, Frankfurt, 2007.
- [Fle-07c] Fleischer, J.; Nigggeschmidt, S.: Prognose der Maschinenzuverlässigkeit unter Berücksichtigung optionaler Ausstattungskomponenten und Serviceleistungen. VDI Seminar, Stuttgart, 2007.
- [Fle-07d] Fleischer, J.; Nigggeschmidt, S.; Köhler, G.: Bilanz und neue Perspektiven - Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Life-Cycle-Performance. In: Instandhaltung Markt 2007.
- [Bos-06] Bosch, R.: Anforderungen und Risiken bei der Erstellung von TCO Verträgen. Herbsttagung 2006, Life-Cycle-Performance – Aktuelle Entwicklungen, Karlsruhe, 2006.
- [Der-06] Dervisopoulos, M.; Schatka, A.; Torney, M.; Wawerla, M.: Life Cycle Costing im Maschinen- und Anlagenbau. In: Industrie Management 22 (2006) 6
- [Fle-06] Fleischer, J.; Wawerla, M.: Berechnung von Lebenszykluskostenverteilungen. In: WT-Online, Jahrgang 96 (2006) H. 10 S.772-777
- [Fle-06a] Fleischer, J.; Weismann, U.; Nigggeschmidt, S.: Verfügbarkeits- und Lebenszykluskostenprognose - Ein Ansatz zur Steigerung der Life-Cycle-Performance im Maschinen- und Anlagenbau. In: wt online Jahrgang 96 (2006) H. 7/8 Seite 483-488.
- [Fle-06b] Fleischer, J.; Wawerla, M.; Nigggeschmidt, S.: Bedeutung von Life Cycle Cost im Werkzeugmaschinenbau. in: VDMA-Nachrichten, 05/2006, S. 42-43 Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Frankfurt am Main.
- [Lan-06] Lang, H.: TCO-Verträge Kostenberechnung und Kennwertbestimmung. Herbsttagung 2006, Life-Cycle-Performance – Aktuelle Entwicklungen, Karlsruhe, 2006.
- [Fle-05] Fleischer, J.; Weismann, U.; Schmalzried, S.; Wawerla, M.: Bewertung der Life-Cycle-Performance - Eine Methode zum lebenszyklusorientierten Angebotsvergleich bei produktionstechnischen Anlagen. In: wt-online Ausgabe 7/8-2005, Seite 559
- [Fle-05a] Fleischer, J.; Weismann, U.; Schmalzried, S.; Wawerla, M.: Life-Cycle-Performance, partnerschaftlich zum Ziel. In: wb - Werkstatt und Betrieb, Hanser-Verlag München, Ausgabe 5/2005, S.75-78

6.3 Unveröffentlichte Studien- und Diplomarbeiten

- [Ble-07] Bleich, P.: Erstellung eines Konzepts zur Berücksichtigung der Life Cycle Cost als Kriterium für die Investitionsentscheidung von Maschinen und maschinellen Anlagen. Diplomarbeit, 2007.
- [Kle-07] Klenk, B.: Risikomanagement von Life-Cycle-Cost Verträgen. Diplomarbeit, 2007.
- [Kru-06] Krüger, B.: Wissensbasierte Methodik zur Risikoanalyse von Lebenszykluskostenverträgen in der Werkzeugmaschinenindustrie. Diplomarbeit, 2006.
- [Sch-07] Schmidt, S.: Zuverlässigkeitsprognose durch die Softwareunterstützung des Service. Diplomarbeit, 2007.
- [Ebe-06] Eberhardt, L.: Die Bewertung und Steuerung von Risiken von Betreibermodellen. Diplomarbeit, 2006.
- [Poe-06] Pöppelmeyer, J.: Simulationsgestütztes Risikomanagement von Garantieverträgen. Diplomarbeit, 2006.
- [Pot-06] Pottgießer, C.: Bestimmung der Zuverlässigkeit und Berechnung der Lebenszykluskosten von Gehring Honmaschinen. Diplomarbeit, 2006.
- [Rue-06] Ruess, A.: Ermittlung der Zuverlässigkeit und Lebenszykluskosten von Räummaschinen. Diplomarbeit, 2006.
- [Sch-06] Schradi, P.: Bewertung und Reduzierung der Risiken von Lebenszykluskostenverträgen im Angebotsbearbeitungsprozess. Diplomarbeit 2006.
- [Wer-06] Werner, P.: Konzeption einer Software zur Angebotserstellung auf Basis von Lebenszykluskosten. Studienarbeit, 2006.
- [Nag-05] Nagel, M.: Simulation ausfallabhängiger Lebenszykluskosten - Ein Ansatz zur Ermittlung der Verteilung von Lebenszykluskosten bei Maschinen. Diplomarbeit, 2005.
- [Nig-05] Niggeschmidt, S.: Ermittlung der Zuverlässigkeit und der Lebenszykluskosten von Bearbeitungszentren am Beispiel der Komponentenfertigung in der Automobilindustrie. Diplomarbeit, 2005.
- [Sch-05] Schröder, M.: Auswahl und Strukturierung relevanter Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen als Grundlage einheitlicher Angebotsprozesse. Diplomarbeit 2005.

6.4 Weiterführende Literatur

- /Ahm-95/ Ahmed, N. U.: A design and implementation model for life cycle cost management system, *Information & Management* 28 (1995), S. 261-269.
- /Asi-98/ Asiedu, Y.; Gu, P.: Product life cycle cost analysis: state of the art review, *International Journal of Production Research* 36 (1998) 4, S. 883-908.
- /Arn-98/ Arnold, D.: *Materialflusslehre*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2.Auflage, Braunschweig/Wiesbaden 1998.
- /Bec-04/ Bechle, A.: TCO-Prognose bei einem Werkzeugmaschinenhersteller. wbk-Herbsttagung 2004, Life-Cycle-Performance, Karlsruhe, 2004.
- /Ben-03/ Ben-Arieh, D.; Qian, L.: Activity-based cost management for design and development stage, *International Journal of Production Economics* 83 (2003), S. 169-183.
- /Ber-89/ Bertsche, B.: Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten, Univ. Stuttgart, Diss. 1989.
- /Ber-99/ Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*, Springer, Berlin 1999.
- /Bir-91/ Birolini, A.: *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- /Bir-97/ Birolini, Alessandro: "Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen" (1997), Springer Verlag, Zürich, S.3ff, S.249.
- /Bir-04/ Birolini, A.: *Reliability Engineering – Theory and Practice*, 4th ed., Springer, Berlin 2004.
- /Bla-78/ Blanchard, B. S.: *Design and manage to life cycle cost*, M/A Press, Portland 1978.
- /Bla-02/ [Bläsing, J., Eichel, D. : „Workbook FMEA, Failure Mode and Effects Analysis“. TQU Verlag Ulm, 2002.
- /Bli-94/ Blischke, W. R.; Murthy, D. N. P.: *Warranty Cost Analysis*, Marcel Decker, New York 1994.
- /Bli-00/ Blischke, W. R.; Murthy, D. N. P.: *Reliability – Modelling, Prediction, and Optimization*, Wiley, New York 2000.
- /Bra-99/ Brath, J.: Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien. Dissertation am Institut für Produktionstechnik (wbk), 1999.
- /Bru-96/ Brundick, B.: *Parametric Cost Estimation Handbook*, US Navy, Arlington 1996.
- /Brü-99/ Brüggemann, H.; Schimmelpfeng, K.; Seufzer, A.: Lebenszyklusorientierte Anlagenplanung – Ergebnisse einer Untersuchung decken Einsparpotentiale auf, *VDI-Z 141 (1999) 3/4*, S. 18-19.
- /Buc-00/ Buchholz, C.; Schmäzle A.: Wiederverwendung von Montageanlagen, *Umweltgerechte Produktentwicklung (Loseblattsammlung)*, Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2000.
- /Cha-96/ Chang, S.; Shinozuka, M.: Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk, *Journal of Infrastructure Systems* (1996) September, S. 118-126.
- /Coi-97/ Coit, D. W.; Smith, A. E.: Considering Risk Profiles in Design Optimization for Series-Parallel Systems, *Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1997.
- /Dam-04/ Damm, H.: Solide Technik dominiert die Kunden-Präferenzen – Branchenumfrage Servicequalität, *Werkstatt und Betrieb* (2004) 9, S. 89-94.
- /DGQ-02/ Deutsche Gesellschaft für Qualität (Hrsg.): *Zuverlässigkeitsmanagement: Einführung in das Management von Zuverlässigkeitsprogrammen*, Berlin, Beuth, 2002.
- /DIN-90a/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 25448, Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse). Beuth-Verlag, Berlin 1990.
- /DIN-90b/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 40041, Zuverlässigkeit, Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin 1990.
- /DIN-99/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 60300-3-3, Zuverlässigkeitsmanagement, Beuth-Verlag, Berlin 1999.
- /DIN-01/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN EN 13306:2001, Begriffe der Instandhaltung, Beuth-Verlag, Berlin 2001.

- /DIN-02/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): "DIN EN 61703: Mathematische Ausdrücke für Begriffe der Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft" (2002), Beuth Verlag, Berlin.
- /DIN-02a/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN IEC 62198:2002-09, Risikomanagement für Projekte, Anwendungsleitfaden, Beuth-Verlag, Berlin 2002.
- /DIN-04/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN IEC 61649, Weibull-Analyse – Anpassungstests und Vertrauensbereiche von Weibull verteilten Daten, Beuth-Verlag, Berlin 2004.
- /DIN-05/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 60300-3-3, Zuverlässigkeitsmanagement, Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten, Beuth-Verlag, Berlin 2005.
- /Dod-80/ MIL-STD-1629A: Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, U.S. Department of Defense, 1980.
- /Dod-89/ Military Standard 337: „Design to Cost“. Department of Defense (DoD); MIL-STD-337 Design to Cost. United States of America. Washington, 1989.
- /Dod-95/ MIL-HDBK-217: Reliability Prediction of Electronic Equipment: U.S. Department of Defense, 1995.
- /Dod-03/ Department of Defense: The Defense Acquisition System. Directive Number 5000.1; Washington, 2003.
- /Dom-05/ Dombrowski, U.; Horatzek, S.; Wrehde, J.: Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement, Carl Hanser Verlag, ZWF Jahrgang 100 (2005) 4, München 2005.
- /Dre-00/ Dreger, W.: Erfolgreiches Risiko-Management bei Projekten, expert-Verlag, Wien 2000.
- /Duv-99/ Duverlie, P.; Castelain, J.M.: Cost Estimation During Design Step: Parametric Method versus Case Based Reasoning Method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15 (1999) 12, S. 895-906.
- /Ebn-96/ Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten. Forschungsberichte iwv, Band 101, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg 1996.
- /Eit-96/ Eitrich, O.: Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation, Univ. Karlsruhe, Diss. 1996.
- /Eve-98/ Eversheim, W.; Neuhausen, J.; Sesterhenn, M.: Design-to-Cost for Production Systems, Annals of the CIRP 47 (1998) 1, S. 357-360.
- /Gut-04/ Gutmann, M.: Untersuchung der Zusammenhänge zwischen hydraulischen Messgrößen und Ausfallsachen elektrohydraulischer Stanzmaschinen unter Nutzung vorhandener Überwachungssensoren, Fleischer, J. (Hrsg.): Diagnosemöglichkeiten in Werkzeugmaschinen, Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe 2004.
- /Fab-91/ Fabrycky, W. J.; Blanchard, B. S.: Life-cycle cost and economic analysis, Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering 1991.
- /Fil-96/ File, W. T.: The Application and Benefits of Cost Effective Maintenance, in: [Rao-96], S. 419-440.
- /Fle-04aa/ Fleischer, J. et al.: Life-Cycle-Performance in der Produktionstechnik, VDI-Z 146 (2004) 10, S. 87-90.
- /Fle-04ab/ Fleischer, J.; Rus, T.; Gutmann, M.: Diagnose elektrohydraulischer Anlagen am Beispiel einer Stanzmaschine. In: Instandhaltung und Produktion - Integriert in die Zukunft, 25. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung. VDI-Berichte 1826, S. 101-116, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2004.
- /Fle-05a/ Fleischer, J.; Nesges, D.: Enhancing Operational Availability by Harmonization of Equipment Elements with Product-accompanying Services. In: Production Engineering Vol. XII/1 (2005), S. 193-196.
- /Fle-05b/ Fleischer, J.; Nesges, D.: CIRP Life Cycle Engineering 2005, Grenoble, 3.-5. April 2005.: Identifying Availability Contribution of Lifecycle-adapted Services.
- /Fle-05c/ Fleischer, J.; Lanza, G.; Ender, T.: Prozessinnovation durch prozessbasierte Qualitätsprognose im Produktionsanlauf. In ZWF 9/2005, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, S.510-516, 2005.
- /Fle-05d/ Fleischer, J.; Lanza, G.; Ender, T.: OEE Simulation in Production Ramp-up. In: Tagungsband Industrial Simulation Conference 2005, Fraunhofer IPK Berlin ISBN 90-77381-18-X S. 173 – 178.
- /Fri-98/ Friedel, A.; Osten-Sacken, D. v. d.: Kombinierte Lebenslauf-Erfolgsrechnung und Ökobilanzierung, Konstruktion 50 (1998) 6, S. 40-44.
- /Fri-01/ Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo-Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Dissertation am IMA, Stuttgart, 2001.

- /Für-92/ Fürnrohr, M.: Stochastische Modelle zur Prognose von Lebenszykluskosten komplexer Systeme, Universität der Bundeswehr München, Diss. 1992.
- /Ger-97/ Gera, A. E.: The Modified Exponentiated Weibull Distribution for Life Time Modelling, Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium 1997.
- /Gra-99/ Granthien, M.; Höft, J.; Schimmelpfeng, K.: Lebenszyklusorientierte Kostenbetrachtung im Rahmen der industriellen Anlagenwirtschaft, krp Kostenrechnungspraxis 43 (1999) 4, S. 233-238.
- /Gro-04/ Grob, M.: Neue Zusammenarbeitsmodelle zwischen Werkzeugmaschinenherstellern und OEMs am Beispiel der Motorenfertigung, wbk-Herbsttagung 2004 Life-Cycle-Performance, Karlsruhe 15.11.2004.
- /Gün-97/ Günther, T.; Kriegbaum, C.: Life Cycle Costing, Das Wirtschaftsstudium 10/1997, S. 900-912.
- /Hor-93/ Horvath, P.: Target Costing, Stuttgart 1993.
- /Ish-95/ Ishii, K.: Life-Cycle Engineering Design, Transactions of the ASME 117 (1995), S. 42-47.
- /Kaf-99/ Kafka, C.: Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining, Diss., Univ. Karlsruhe 1999.
- /Kal-80/ Kalbfleisch, J.D.; Prentice, R.L.: The Statistical Analysis of Failure Time Data, Wiley, New York 1980.
- /Kaw-99/ Kawachi, Y.; Rausand, M.: Life Cycle Cost (LCC) analysis in oil and chemical process industries, 1999.
- /Keg-90/ Kegel, K. P.: Risikoanalyse von Investitionen, Toeche-Mittler Verlag, Darmstadt 1990.
- /Kem-99/ Kemminer, J.: Lebenszyklusorientiertes Kosten- und Erlösmanagement, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 1999.
- /Key-90/ Keys, L. K.: System Life Cycle Engineering and DF"X", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 13 (1990) 1, S. 83-93.
- /Kör-96/ Körsmeier, R.: Kundennahe, rechnerunterstützte Angebotserstellung im Vertriebsaußendienst für komplexe Investitionsgüter, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996.
- /Kot-99/ Kotler, P., Bliemel, F.: Marketing-Management, Stuttgart, 1999.
- /Kra-97/ Kratzheller, J. B.: Risiko und Risk Management aus organisationswissenschaftlicher Perspektive, Deutscher Universitätsverlag, 1997.
- /Kra-04/ Krawitz, G.: Beschaffungsstrategien unter Berücksichtigung von Life-Cycle-Costing, VDI Nachrichten Konferenz Life-Cycle-Costing, Augsburg 07.10.2004.
- /Lan-92/ Lang, C.: Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung, Springer, Berlin, 1992.
- /Lan-04/ Lanza, G.: Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen. Dissertation am Institut für Produktionstechnik. Karlsruhe, 2004.
- /Lar-75/ Large, J. P.; Campbell, H. G.; Cates, D.: Parametric Equations for Estimating Aircraft Airframe Costs, Rand Corporation, Santa Monica 1975.
- /Lay-03/ Lay, G. et al.: Betreiben statt Verkaufen – Stand und Perspektiven neuer Geschäftsmodelle für den Maschinen- und Anlagenbau, Industrie Management 19 (2003) 4, S. 9-14.
- /Lee-96/ Lees, F. P.: Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths 1996.
- /Lin-98/ Lindquist, B. H.; Amundrustad, H.: Markov Models for periodically tested components, Proceedings of ESREL 1998.
- /Loc-04/ Locher, C., Mehlaui, J.I., Hackenberg, R.G., Wild, O.: Risikomanagement in Finanzwirtschaft und Industrie.
- /Mar-02/ Marseguerra, M.; Zio, E.: Basics of the Monte Carlo Method with application to systems reliability, LiLelo Verlag, 2002.
- /McK-02/ McKinsey, WZL-Aachen: Profitable Wachstumsstrategien für den Maschinenbau - Studie, Frankfurt, VDMA-Verlag, 2002.
- /Met-49/ Metropolis, N.; Ulam, S.: The Monte Carlo Method. Journal of the American Statistical Association, 1949.
- /Mey-03/ Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren, Hanser 2003.
- /Mil-91/ Miller, P. E.; Moore, R. I.: Field Reliability, Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability

- Symposium 1991.
- /Ne-05/ Nesges, D.: Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen. Dissertation am Institut für Produktionstechnik (wbk), 2005.
- /Ost-99/ Osten-Sacken, D. v. d.: Lebenslauforientierte, ganzheitliche Erfolgsrechnung für Werkzeugmaschinen, Jost Jetter, Heimsheim 1999.
- /Pla-97/ Platis, A. N., et al.: Asymptotic Availability of Systems modelled by Cyclic Non-Homogeneous Markov Chains, Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium 1997.
- /Pri-88/ Priest, J. W.: Engineering Design for Producability and Reliability, Marcel Dekker, New York 1988.
- /Rau-04/ Rausand, M.; Arnljot H.: System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications, Wiley, New York 2004.
- /Ros-05/ Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Springer, Heidelberg, 2005.
- /Roy-03/ Roy, R.: Cost Engineering: Why, What and How? Decision Engineering Report Series, Cranfield University 2003.
- /Sch-00/ Schmälzle, A.: Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen, Diss., Univ. Karlsruhe 2000.
- /Sch-04/ Schuh, G.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 94 (2005) 4.
- /Shr-05/ Shrivastava, A.: Life Cycle Costing of Machinery and Equipment, CIRP Reconfigurable Manufacturing Systems 2005, Ann Arbor, 10. bis 12. Mai 2005.
- /She-98/ Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures, The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998), S. 325-349.
- /Smi-98/ Smith, D. J.: Reliability, Maintainability and Risk, Elsevier 1998.
- /Spa-01/ Spath, D.; Lanza, G.; Herm, M.: Multi Agent System for Multi Enterprise Scheduling, The 11. International IFIP Conference, Budapest 2001.
- /Spa-02a/ Spath, D.: Verteilte Modellierung, Simulation und Steuerung von Geschäftsprozessen mit generischen Petri-Netzen, Abschlussbericht, Karlsruhe 2002.
- /Spa-02b/ Spath, D.; et al.: Geschäftsprozesse mit generischen Petri-Netzen, ZWF, 2002.
- /Sta-04/ Stauch, V.: Total Cost of Ownership (TCO) bei Daimler Chrysler – ein Beitrag zur wirtschaftlichen Produktionseinrichtung, wbk-Herbsttagung 2004 Life-Cycle-Performance, Karlsruhe, 15.11.2004.
- /Tel-99/ Telcordia SR-332, Issue 1, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment, Telcordia Technologies, 1999.
- /Tön-03/ Tönshoff, H. K.; Eger, M.; Oelschläger, H.: Lebenszykluskosten in der Angebotserstellung, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93 (2003) 11.
- /Tön-04/ Tönshoff, H. K.; Eger, M.; Baer, M.: Folgekosten im Fokus, Werkzeugqualität nach Lebenszykluskosten bestimmen, Qualität und Zuverlässigkeit 49 (2004) 10, S. 74-76.
- /Tre-00/ Trender, L.: Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung, Diss., Univ. Karlsruhe 2000.
- /Tri-95/ Tripp, H.; Probst, J.: Using R&M Analysis to Calculate Economic Risk in the Process Industries, Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium 1995.
- /Urb-05/ Urbani, A.; Mauro, B.: Life Cycle Cost for investment evaluation: methodology and application to an automotive plant, CIRP Reconfigurable Manufacturing Systems 2005, Ann Arbor, 10. bis 12. Mai 2005.
- /VDI-83/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Angebotserstellung in der Investitionsgüterindustrie, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1983.
- /VDI-85/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4009-5, Weibull-Verteilung und andere Extremwertverteilungen, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1985.
- /VDA-86/ Verband der Automobilindustrie e.V.: Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, Frankfurt 1986.
- /VDI-98/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4001-2, Allgemeine Hinweise zum VDI-Handbuch

- Technische Zuverlässigkeit. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1998.
- /VDI-99/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4008, Monte-Carlo-Simulation. VDI-Verlag, Düsseldorf 1999.
- /VDI-03/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2884 Entwurf: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing, Beuth, Berlin 2003.
- /VDI-04/ Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4003, Zuverlässigkeitsmanagement, Entwurf, Beuth-Verlag, Berlin 2004.
- /VDI-05/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): "VDI 4001, Blatt 2: Terminologie der Zuverlässigkeit" (2005), Beuth Verlag, Berlin.
- /VDM-06/ VDMA-Einheitsblatt 34160: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.
- /Wei-51/ Weibull, W.: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, ASME Journal of Applied Mechanics, Stockholm 1951.
- /Wes-98/ Westkämper, E.; Osten-Sacken, D. v. d.: Produktlebenslauforientierte Erfolgsrechnung – Life Cycle Costing für komplexe Werkzeugmaschinen, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 93 (1998) 6, S. 244-246.
- /Wes-00/ Westkämper, E.; v.d. Osten-Sacken, D.: The Method of Life Cycle Costing Applied to Manufacturing Systems, Production Engineering 7 (2000) 1, S. 135-138.
- /Wes-04/ Westkämper, E.; Niemann, J.: Dynamisches Life Cycle Controlling von Ganzheitlichen Produktionssystemen mit erfahrungskurvenbasierten Planungsverfahren, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 94 (2004) 10.
- /Weu-03/ Weule, H. et al.: DiHyPro – a diagnostic tool for electro-hydraulic machines. Production Engineering - research and development in Germany, WGP-Annals X (2003) 2, S. 97-100.
- /War-92/ Warnecke, H.-J. (Hrsg.): Handbuch Instandhaltung, Band 1 Instandhaltungsmanagement. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1992.
- /Wüb-84/ Wübbenhorst, K. L.: Konzept der Lebenszykluskosten – Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge, Verlag für Fachliteratur, Darmstadt 1984.
- /Zeh-96/ Zehbold, C.: Lebenszykluskostenrechnung, Gabler, Wiesbaden 1996.