

**Konfigurationsmanagement
als Mittel der Instandhaltungsanalyse**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Gerald Masan
geboren am 5. August 1968 in Hannover

2007

1. Referent

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Hans Kurt Tönshoff

2. Referent

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus

3. Referent

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Tag der Promotion

6. Juni 2007

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt ein Vorgehen, die mit den Mitteln des Produktdatenmanagements eine Unterstützung der Instandhaltung eines Produktionsunternehmens ermöglicht. Zunächst wird ein Methode zur Modellierung des Soll-Zustands entwickelt. Ausgehend vom Begriff der Fertigungskette wird eine Produktstruktur für Werkzeugmaschinen abgeleitet, die auf die Bedürfnisse der Instandhaltung zugeschnitten ist. Dieses Modell – der Anlagengraph – stellt eine integrierte Sicht auf Funktionen und Komponenten einer Anlage dar. Der Anlagengraph ermöglicht, den Begriff des Anlagenzustands mit Hilfe des Konfigurationsmanagements darzustellen.

Basierend auf dem Anlagengraphen wird eine Methode entwickelt, mit der Felddaten zu einer Zustandsbewertung verdichtet werden können. Passend zur vorgestellten Methode wird ein Vorgehensmodell für die Instandhaltung entwickelt, das die Abarbeitung jeglicher Maßnahmen in einem 5-Stufen-Modell strukturiert.

Abstract

(Configuration Management and Condition Monitoring)

Maintenance is an important function of every production works. The most important step towards condition based maintenance is to determine the nominal condition and evaluate the current condition. This report describes a consecutive set of methods for modelling the nominal condition and evaluate the current state based on the needs of the production system: Starting from the concept of production chains the necessary manufacturing functions are derived. Then the realisation of these functions by the production equipment is expressed using the equipment graph. The concept of the equipment graph is derived from the concepts of product data management. It is shown, that condition and configuration are essentially the same.

In application, the equipment graph provides a powerful means to evaluate the current condition of the described equipment. Various examples for this calculation are given and it shown how the results a fed into the process cycle of maintenance activities.

Schlagworte: Instandhaltung, Zustandsbewertung, Produktstruktur

Keywords: Maintenance, Condition Monitoring, Product Data Management

Danksagungen

Die Arbeit entstand während meiner Zeit im IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH. Meinem Doktorvater Prof. Tönshoff danke ich für die langjährige Unterstützung. Herrn Dr.-Ing. Rainer Martens und dem Center TZ der MTU München danke ich für Anregungen. Frau Prof. Awizus danke ich für die Übernahme des Koreferats und ihre Anmerkungen. Herrn Prof. Overmeyer danke ich für die unkomplizierte Übernahme des dritten Referats. Herrn Prof. Poll für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meine Kollegen des SFB 384 und insbesondere Kirsten Tracht danke ich für viele Diskussionen.

Tübingen, Juli 2007

Gerald Masan

Konfigurationsmanagement als Mittel der Instandhaltungsanalyse

Abkürzungen und Formelzeichen	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Neue Aufgaben für die Instandhaltung	1
1.2 Zielsetzungen	3
1.3 Vorgehensweise	6
1.4 Prämissen der Zustandsverfolgung für Produktionsanlagen	7
1.5 Grundlegende Konzepte	9
1.5.1 Herleitung des Zustandsbegriffs	9
1.5.2 Abgrenzung von Überwachung und Diagnose	14
2 Stand des Wissens	16
2.1 Darstellung von Zuständen: Zustandsmodellierung	16
2.1.1 Zustandsmodelle für Black-Box-Systeme	19
2.1.1.1 Modell des Abnutzungsvorrats	19
2.1.1.2 Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit	21
2.1.1.3 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	22
2.1.1.4 Effizienzbeurteilung	24
2.1.2 Zustandsmodelle für zusammengesetzte Systeme	25
2.1.2.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	26
2.1.2.2 Fehlerbaum-Analyse	27
2.1.2.3 Systemtheorie nach Boole	28
2.1.2.4 Markov-Modell	29
2.1.2.5 Zuverlässigkeit von Produktionssystemen	30
2.2 Ermittlung von Zuständen: Überwachung und Diagnose	31
2.2.1 Objektive Überwachung	32
2.2.2 Subjektive Überwachung	34
2.2.3 Diagnose	35
2.2.3.1 Strukturbasierte Methoden	35
2.2.3.2 Wissensbasierte Methoden	36
2.2.3.3 Methode der analytischen Redundanz	37
2.3 Bewertung von Zuständen: Instandhaltungsmanagement	38
2.3.1 Instandhaltungsstrategien	38

2.3.2	Instandhaltungsanalyse	40
2.3.3	Instandhaltungsplanung	40
2.3.4	Integrierte Instandhaltungsplanung und -analyse	41
2.3.5	Integrierte Produktmodelle	43
2.4	Aktuelle Forschungstrends	45
2.5	Kritische Würdigung	46
3	Bestimmung von Merkmalsmenge und der Merkmalsausprägung	51
3.1	Einführung in das Anwendungsszenario	51
3.2	Merkmalsmenge einer Fertigungskette	53
3.3	Berücksichtigung vernetzter Fertigungsketten	57
3.4	Folgerungen für die Instandhaltung	59
3.5	Erfassung von Merkmalsausprägungen	60
3.5.1	Informationsquellen für Felddaten	62
3.5.1.1	Objektive Überwachung	64
3.5.1.2	Subjektive Überwachung	64
3.5.1.3	Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem	66
3.5.1.4	Qualitätskontrolle - Computer Aided Quality Assurance System	67
3.5.2	Zusammenfassung: Vertrauensbereiche für Felddaten	68
4	Einleitung von Instandhaltungsmaßnahmen	69
4.1	Direkte Maßnahmeneinleitung	69
4.2	Indirekte Maßnahmeneinleitung	71
4.2.1	Zusammenhang von Komponenten- und Funktionsinformation	74
4.2.2	Anlagengraphen	75
4.2.2.1	Grundlegende Definitionen	76
4.2.2.2	Anlagengraph für das Beispielszenario	77
4.2.3	Systematik zum propagationsgerechten Aufbau von Anlagengraphen	79
4.2.4	Konfigurationsänderungen im Anlagengraph	86
4.2.5	Auswertung von Felddaten mit dem Anlagengraphen	89
4.2.5.1	Prüfung der Effektivität	89
4.2.5.2	Prüfung der Effizienz	93
4.2.6	Einbindung in den Tätigkeitszyklus	98
5	Ergebnisse und ihre Bedeutung	100
5.1	Zusammenfassung	100
5.2	Offene Fragen	103
5.2.1	Aufbau einer quantitativen Zustandsmetrik	103
5.2.2	Sensitivität berechneter Effizienz Kennzahlen bei Variantenbildung	104
5.3	Ausblick	106
	Literatur	108

Anhang		123
A1	Vereinfachtes Zeitmodell	123
A2	Zusammenfassung Felddaten im Beispielszenario	124
A3	Zusammenfassung Anliegen im Beispielszenario	125
A4	Anlagengraph für das Beispielszenario: Betriebskalendertag 1	126
A5	Graphische Darstellung Verlauf Effektivitätsfunktion	127

Abkürzungen und Formelzeichen

$[\dots]_{a,b}$	Intervall a...b
A	Verfügbarkeit
a	Zählindex
BKT	Betriebskalendertag
C_m	Maschinenfähigkeit
C_p	Prozessfähigkeit
$C_{p(ind)}$	Prozessfähigkeitsindex
d	Dekompositionsobjekt
E_A	Anlageneffizienz (OEE)
E_S	Gesamteffektivität des Arbeitsplatzes S
$FMEA$	Fehlermöglichkeiten und –einfluss-Analyse
f_{WBW}	Wiederbeschaffungswert-Faktor
I	Investitionskosten
i_d	Einzel-Investitionskosten des Dekompositionsobjekts d
j	Investitionskosten innerhalb Betrachtungsperiode
K	Instandhaltungskosten
k_d	Einzel-Instandhaltungskosten des Dekompositionsobjekts d
N	Overall Equipment Efficiency, OEE
Q	Instandhaltungskostenrate
S	Spannbaum, stellt einen Arbeitsplatz dar
t_0	Beobachtungszeitpunkt
t_l, t_x	Zeitpunkt
T_B	Störungsfreie Laufzeit
T_N	Anwendungsdauer
T_P	Nettoproduktivzeit
TPM	Total Productive Maintenance
W	Wiederbeschaffungswert
ε_S	Effektivität des Arbeitsplatzes S
τ_S	Betriebsbereitschaftsfunktion des Arbeitsplatzes S
$\lambda(t)$	Ausfallrate

Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung 1</u>	Tätigkeitszyklus der Instandhaltung von Produktionsanlagen	2
<u>Abbildung 2</u>	Erweiterter Instandhaltungsprozess	3
<u>Abbildung 3</u>	Ansatz einer Zustandsbewertung über den Abgleich vorhandener zu geforderter Funktionalität.....	4
<u>Abbildung 4</u>	Jede Systemreaktion enthält eine Aussage zum Ist-Zustand	5
<u>Abbildung 5</u>	Auffassung der Tätigkeiten der Instandhaltung als Konfigurationsmanagement.....	6
<u>Abbildung 6</u>	Für den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung relevante Forschungsgebiete und Technologien.....	7
<u>Abbildung 7</u>	Begriffshierarchie: Elemente eines Produktionssystems	10
<u>Abbildung 8</u>	Tätigkeiten der Überwachung und Diagnose eingeordnet in den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung.....	15
<u>Abbildung 9</u>	Zustandsraum nach [Niemeier95], schematisch.....	18
<u>Abbildung 10</u>	Gliederung des Begriffs System Effektiveness nach [Kececioglu95].....	19
<u>Abbildung 11</u>	Abnutzungsvorrat am Beispiel eines Wellenstumpfes	20
<u>Abbildung 12</u>	Zeitverlauf des Abnutzungsvorrats, siehe auch Abbildung 11	20
<u>Abbildung 13</u>	Zeitliche Struktur der Betriebsbereitschaft	22
<u>Abbildung 14</u>	Verfügbarkeiten nach VDI4004; nach [Köhrmann00]	23
<u>Abbildung 15</u>	Verlauf der Ausfallrate $\lambda(t)$ über die Zeit.....	23
<u>Abbildung 16</u>	Gliederung der Zuverlässigkeitsmodelle für technische Systeme.....	26
<u>Abbildung 17</u>	Fehlerbaum - Ergebnis einer Fehlerbaumanalyse, v bezeichnet eine der bool'schen Verknüpfungen AND oder OR.....	28
<u>Abbildung 18</u>	Zustandsgraph eines Markov-Modells für ein System mit 2 Komponenten $\{A,B\}$, deren mögliche Zustände funktionstüchtig oder ausgefallen sind.....	30
<u>Abbildung 19</u>	Direkter und indirekter Ansatz der objektiven Überwachung	32
<u>Abbildung 20</u>	Gliederung der Diagnosemethoden.....	35
<u>Abbildung 21</u>	Prinzip der Diagnose mit analytischer Redundanz	37
<u>Abbildung 22</u>	Funktion der Instandhaltungsanalyse nach [Hackstein87].....	40
<u>Abbildung 23</u>	Aufgaben der Instandhaltungsplanung nach [Hackstein87].....	41
<u>Abbildung 24</u>	Schleifarbeitsfolgen an einer Hochdruck-Turbinenschaufel (Quelle: [Wagner04] und Lufthansa)	52

<u>Abbildung 25</u>	Superlegierungen für feingegossenen Lauf- und Leitschaukeln (Quelle: [Steffens04])	52
<u>Abbildung 26</u>	Fertigungskette für ein Produkt P mit den Produktionsanlagen A-E als Abfolge der Funktionen F_1 - F_8	56
<u>Abbildung 27</u>	Funktionsorientierte Fertigungskette für das Szenario (Ausschnittsweise, vgl. Abbildung 24 und Tabelle 9).....	56
<u>Abbildung 28</u>	Ableitung von Anforderungsfunktionen in einer vernetzten Fertigung.....	58
<u>Abbildung 29</u>	Arbeitsplätze dreier Fertigungsketten mit unabhängigen Zuständen.....	59
<u>Abbildung 30</u>	Informationsquellen für zustandsbeschreibende Felddaten.....	61
<u>Abbildung 31</u>	Quantisiertes Zustandsmodell	62
<u>Abbildung 32</u>	Funktions- oder komponentenorientierte Gliederung am Beispiel einer Stanze	72
<u>Abbildung 33</u>	Ansatz „Propagation“ zur vereinheitlichten Verarbeitung von Felddaten, vgl. auch Abb. 32	75
<u>Abbildung 34</u>	Generische Elemente einer Werkzeugmaschine [Tönshoff95].....	79
<u>Abbildung 35</u>	Darstellung der Anforderungsfunktion Kühlschmierung durch einen Anlagengraphen (Ausschnitt aus Anhang A4).....	81
<u>Abbildung 36</u>	Mögliche Formen für Propagationsassoziationen (F: Funktion; K: Komponente)	82
<u>Abbildung 37</u>	Knoten b propagiert auf k_A und k_B , somit sind die Zustände $Z(k_A)$ und $Z(k_B)$ nicht mehr unabhängig.	82
<u>Abbildung 38</u>	Spannbaum für Knoten k_B unter Berücksichtigung gerichteter Kanten.....	83
<u>Abbildung 39</u>	Typisierung von Änderungen anhand des Anlagengraphen.....	87
<u>Abbildung 40</u>	Mögliche Transformationen eines Anlagengraphen.....	88
<u>Abbildung 41</u>	Nachweis der Effektivität im Anlagengraphen, Ausschnitt aus Anhang A4.....	92
<u>Abbildung 42</u>	Zusammenfassung des Kostenstatus für das Szenario.....	95
<u>Abbildung 43</u>	Berechnung der Anlageneffizienz.....	97
<u>Abbildung 44</u>	Unterstützung der Tätigkeiten der Instandhaltung durch Anlagengraphen und Propagation	99
<u>Abbildung 45</u>	Entwicklung eines Anlagengraphen über die Zeit.....	101
<u>Abbildung 46</u>	Zeitlicher Verlauf eines Effizienzmaßes und Einfluss einer Konfigurationsänderung (schematisch)	105
<u>Abbildung 47</u>	Ansatz der Digital Maintenance Workbench als neuer Ansatz für Instandhaltungsplanungssysteme.....	107

Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 1</u>	Beispiele für Effektivitätsmerkmale [nach Aggteleky87]	12
<u>Tabelle 2</u>	Beispiele für Effizienzmerkmale [nach Aggteleky87]	12
<u>Tabelle 3</u>	Entwicklungsphasen eines Anliegens.....	14
<u>Tabelle 4</u>	Aspekte des Zustands von Produktionsanlagen nach [Günther99]	17
<u>Tabelle 5</u>	Gegenüberstellung von Maschinen- und Prozessfähigkeit [nach Weck92].....	21
<u>Tabelle 6</u>	Methoden zur objektiven Überwachung.....	34
<u>Tabelle 7</u>	Übersicht: Eignung der Zustandsmodelle zur Zustandbewertung	47
<u>Tabelle 8</u>	Übersicht: Eignung der Überwachungs- und Diagnosemethoden zur Zustandbewertung	49
<u>Tabelle 9</u>	Anforderungstabelle für Schleifoperation „Fußprofil“	54
<u>Tabelle 10</u>	Tätigkeiten in der Instandhaltung und enthaltene Zustandsaussagen [nach Troppens02].....	61
<u>Tabelle 11</u>	Beispiele für Felddaten aus objektiver Überwachung.....	64
<u>Tabelle 12</u>	Beispiele für Felddaten aus subjektiver Überwachung	65
<u>Tabelle 13</u>	Beispiele für das Felddatum „Instandhaltungsauftrag“	66
<u>Tabelle 14</u>	Beispiele für Felddaten aus der Qualitätskontrolle	67
<u>Tabelle 15</u>	Vertrauensbereiche der verschiedenen Quellen für Felddaten.....	68
<u>Tabelle 16</u>	Durch direkte Maßnahmeneinleitung erzeugte Anliegen im Beispielszenario	70
<u>Tabelle 17</u>	Eignung der Felddaten zur direkten Maßnahmeneinleitung	71
<u>Tabelle 18</u>	Beispiele für typische Störungsmeldungen.....	73
<u>Tabelle 19</u>	Komponententabelle des Beispielarbeitsplatzes	78
<u>Tabelle 20</u>	Alternativen zur Wahl eines Propagationspfades	84
<u>Tabelle 21</u>	Ergebnisse des Abgleichs der Anforderungsfunktionen mit Anlagengraphen und Felddaten	92

1 Einleitung

1.1 Neue Aufgaben für die Instandhaltung

Seit 150 Jahren setzen Fabriken und Manufakturen systematisch Werkzeugmaschinen ein, um Produkte in gleichbleibender Qualität rationell zu fertigen. Anfangs wurden nur die Arbeitsplätze mechanisiert, an denen eine manuelle Fertigung unmöglich war, heute sind an fast allen Prozessschritten einer Fertigung Werkzeugmaschinen beteiligt.

Werkzeugmaschinen sind langlebige Investitionsgüter. Die typische Nutzungszeit spanender Werkzeugmaschinen beträgt 20 bis 25 Jahre¹. Während dieser Zeit werden sie unvermeidbar abgenutzt. Diese Abnutzung zeigt sich, indem eine Maschine gehäuft ausfällt oder viele Produktionsfehler erzeugt. Parallel zur Abnutzung ändern sich häufig die gefertigten Produkte und stellen so neue Anforderungen. Im Gegensatz zu einem biologischen System, z.B. einer Pflanze, ist eine Produktionsanlage als technisches Artefakt jedoch nicht in der Lage, sich selbständig zu regenerieren oder sich neuen Umweltbedingungen anzupassen. Die Betreiber müssen also ständig verfolgen, ob eine Maschine noch ihren Anforderungen genügt und gegebenenfalls Maßnahmen einleiten, die den weiteren erfolgreichen Einsatz in der Produktion sichern (Abbildung 1). In diesem Tätigkeitszyklus werden ständig die Möglichkeiten Anlagenerhaltung und -instandsetzung gegen eine Ausmusterung und Ersatzinvestition in eine leistungsfähigere Anlage abgewogen. Wesentliche Grundlage für eine Entscheidungsfindung ist dabei ein technischer Vergleich von Soll- und Ist-Zustand der Produktionsanlagen und Werkzeugmaschinen.

Für diesen Vergleich und die Ableitung von Maßnahmen müssen vielfältige Informationen zusammengeführt und bewertet werden. Einerseits müssen laufend Daten zum Ist-

¹ Diese Nutzungszeit wird wesentlich von der Dauerhaftigkeit des hergestellten Produktes bestimmt: Papiermaschinen haben eine Lebensdauer bis zu 65 Jahren, Automobil-Produktionsanlagen werden zum Teil nach 5 Jahren ersetzt.

Zustand erfasst und bewertet werden. Typischerweise werden hier Rückmeldungen aus dem Fertigungsbetrieb, eigene Beobachtungen und die Ausgaben von Überwachungs- und Diagnosesystemen herangezogen. Andererseits müssen auch Veränderungen im Soll-Zustand der betreuten Anlagen berücksichtigt werden. Der Soll-Zustand kann sich z.B. durch die Einführung und Fertigung neuer Produkte oder Rationalisierungsbestrebungen ändern. Auch die Eingliederung von bereits im Unternehmen vorhandenen Produktionsanlagen in neue Fertigungslinien erzwingt häufig Umbau- und Verbesserungsmaßnahmen ² (vgl. [Möhring03]). Im Laufe der Zeit verändern solche Maßnahmen die Maschinen, so dass ihre ursprüngliche Konfiguration kaum erhalten bleibt.

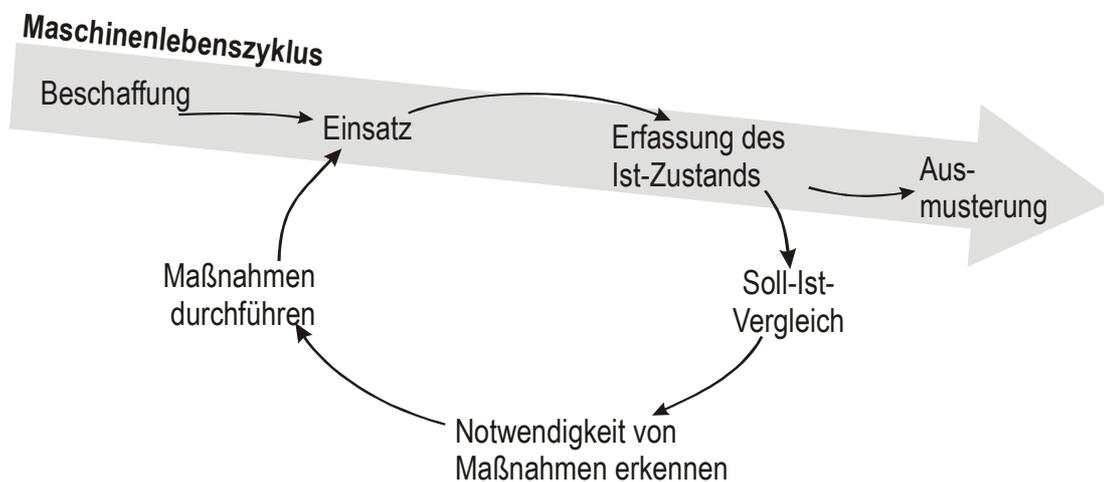


Abbildung 1 Tätigkeitszyklus der Instandhaltung von Produktionsanlagen

Da die Perioden, in denen Anforderungen neu definiert werden, wesentlich kürzer sind als die Perioden der Neubeschaffung, werden immer mehr Produktionssysteme umgebaut (vgl. [Kühnle99]). Die Ausführung dieser Umbauten zur Anpassung eines Produktionssystems an geänderte Anforderungen wird häufig der Instandhaltung übertragen (vgl. [Gudszend03a]). Sie ist somit mitverantwortlich für die Flexibilität einer Produktion [Warnecke92]. Diese Verantwortung geht über die [DIN31051] hinaus, die als Instandhaltung *alle Maßnahmen zur Bewertung und Wiederherstellung des Soll-Zustands und Beurteilung des Ist-Zustands von technischen Mitteln eines Systems* definiert.

Die erweiterte Verantwortung führt zu einer wesentlichen Veränderung der Instandhaltungsprozesse. Parallel zum bisherigen Monitoring des Ist-Zustands muss ein eigen-

² Auch Arbeitssicherheit und Ergonomie sind hier Themen für die Instandhaltung, da in Betrieb befindliche Maschinen neuen gesetzlichen Richtlinien angepasst werden müssen.

verantwortliches Monitoring des Soll-Zustands aufgebaut werden. Und zur ursprünglichen Aufgabe *Instandsetzung* (einschließlich Wartung und Inspektion) kommen die Aufgaben *Umbauten* und *Neuinvestition* (insbesondere Inbetriebnahme) hinzu. Abbildung 2 stellt diesen erweiterten Instandhaltungsprozess dar.

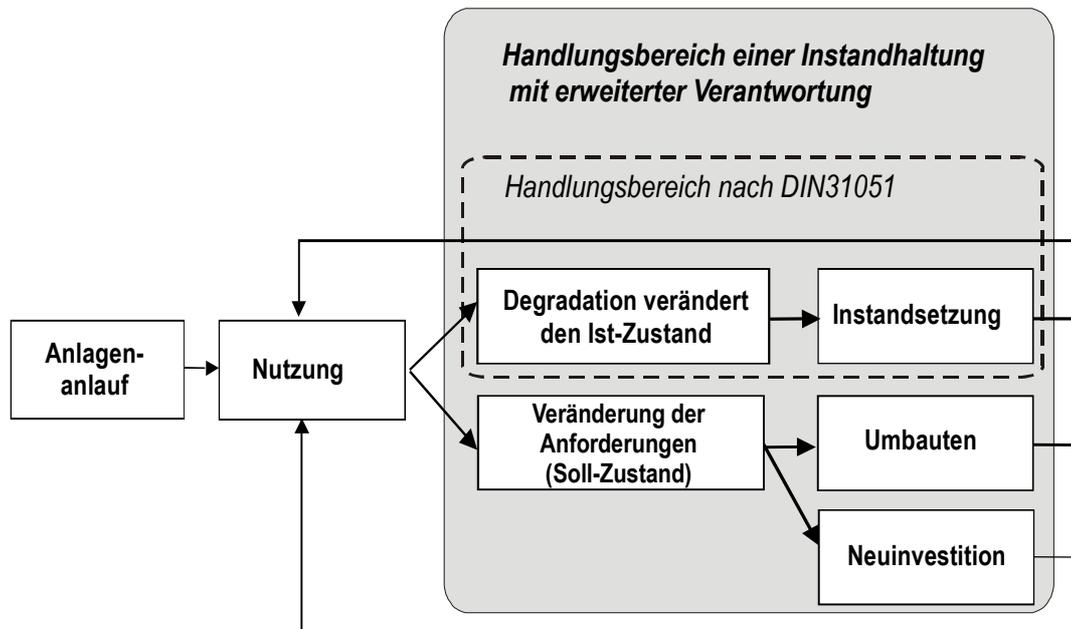


Abbildung 2 Erweiterter Instandhaltungsprozess

Der erweiterte Instandhaltungsprozess muss deutlich mehr Informationen verarbeiten und bewerten als eine konventionelle Instandhaltung. Das Instandhaltungsmanagement muss auf Änderungen des Ist-Zustands und des Soll-Zustands reagieren und entsprechende Maßnahmen einleiten. Zusätzlich ist für die effiziente Maßnahmenplanung ein einheitliches operatives Vorgehensmodell für die drei Maßnahmenarten Instandsetzung, Umbauten und Neuinvestition, notwendig. Nur dann kann durch eine integrierte Planungssicht der Einsatz von Kapazität und Ressourcen effizient geplant werden.

1.2 Zielsetzungen

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines einheitlichen Vorgehensmodells für alle Maßnahmenarten der Instandhaltung und der dazu notwendigen, formalen Modelle. Kernthema des Vorgehensmodells ist eine Bewertung des Anlagenzustands anhand eines Soll-Ist-Vergleichs. Der Soll-Zustand wird dazu in Form von Anforderungsfunktionen dargestellt (Abbildung 3). Diese Darstellung beschreibt, welche Funktionen in welcher Qualität vorhanden sein müssen, um die wirtschaftliche Fertigung von Produkten

zu ermöglichen. Erstes Teilziel dieser Arbeit ist daher, eine Methode zum Aufbau des Anforderungsmodells zu entwickeln.

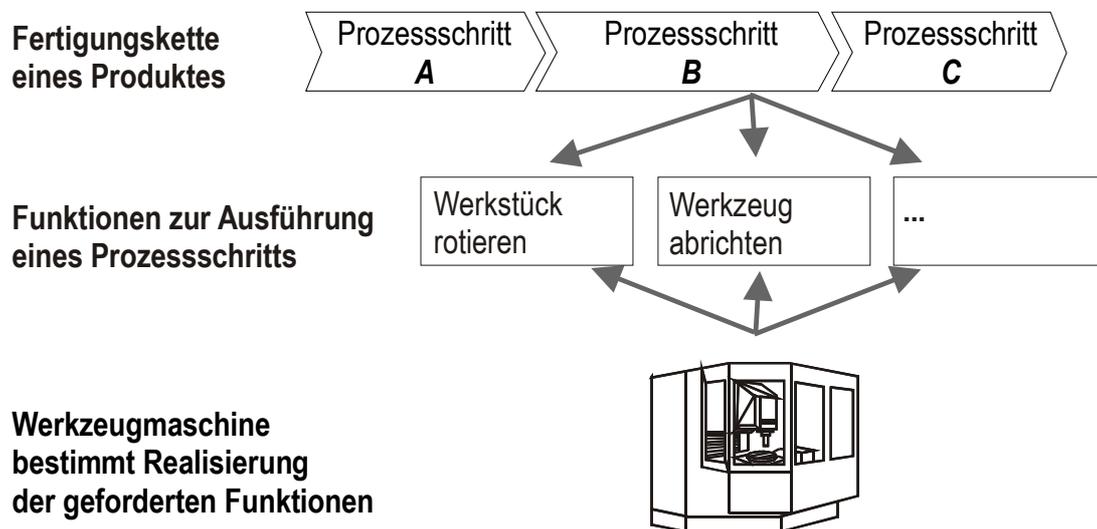


Abbildung 3 Ansatz einer Zustandsbewertung über den Abgleich vorhandener zu geforderter Funktionalität

Die Anforderungen werden durch die Maschinen und Anlagen der Produktion realisiert. Ob und in welcher Qualität die Anforderungen erfüllt werden, kann anhand von Felddaten geprüft werden. Eine Maschine in Betrieb erzeugt kontinuierlich eine Fülle von Felddaten, die vielfach Informationen zu ihrem Zustand enthalten (Abbildung 4). Auffällige Soll-Ist-Abweichungen lassen sich zum Beispiel anhand von Störungsmeldungen erkennen. Störungsmeldungen sind jedoch nicht die einzigen Felddaten, die der Instandhaltung zur Verfügung stehen. Auch Rückmeldungen anderer Systeme enthalten Aussagen über Abweichungen, die zwischen Soll und Ist eingetreten sind. Diese Felddaten beziehen sich aber nur selten direkt auf Anforderungsfunktionen, so dass sich ein Instandhaltungsbedarf nicht unmittelbar erschließt. Ein Verfahren, um die verfügbaren Felddaten zur Zustandsbewertung heranzuziehen, wird in dieser Arbeit entwickelt.

Wesentlich für den Erfolg dieses Ansatzes ist ein geeignetes Vorgehen, um die Elementarfunktionen sowohl der Fertigungssysteme als auch der Produktionsanlagen zu bestimmen. Dazu wird eine Methode entwickelt, mit der das grundlegende, funktionale Modell eines Fertigungssystems und seiner Maschinen aufgebaut werden kann. Die systematische Administration dieses Modells kann als eine spezielle Form des Konfigurationsmanagements betrachtet werden (Abbildung 5). Dabei wird nicht mehr zwischen den Begriffen Konfiguration und Zustand unterschieden. Durch diesen Ansatz können alle operativen Tätigkeiten der Instandhaltung als Reaktionen auf eine

Konfigurationsänderung aufgefasst werden. Denn weicht nach einer Änderung die Ist- von der Soll-Konfiguration ab, ist eine Maßnahme notwendig. Unerheblich ist dabei die Herkunft der Konfigurationsänderung, da in jedem Fall eine Aktion durch die Instandhaltung notwendig ist. Modifikationen der Konfiguration sind sowohl im Ist als auch im Soll möglich, die dabei entstehenden Abweichungen von Soll und Ist führen zu Maßnahmen.

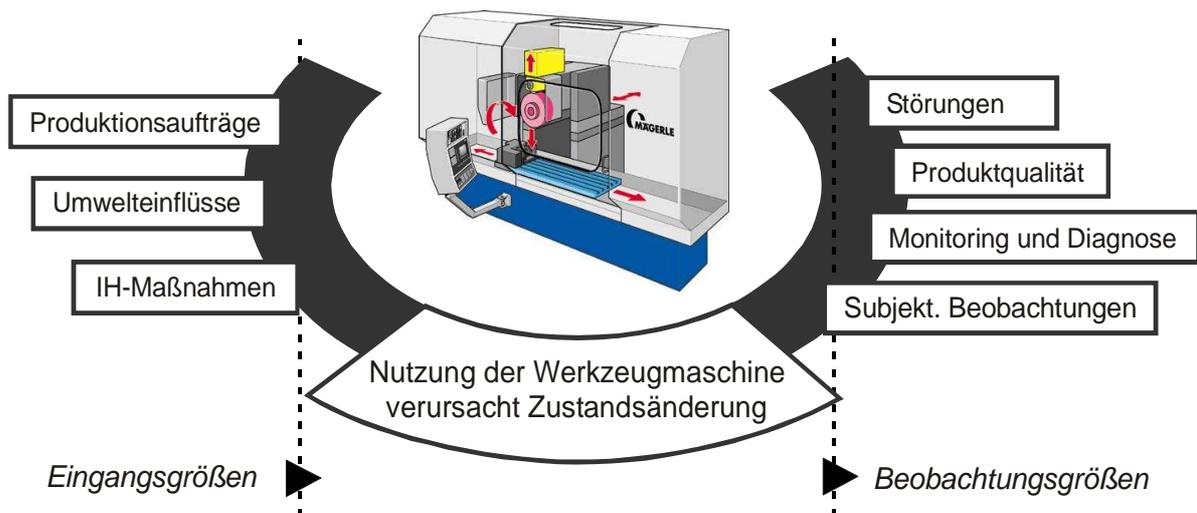


Abbildung 4 Jede Systemreaktion enthält eine Aussage zum Ist-Zustand

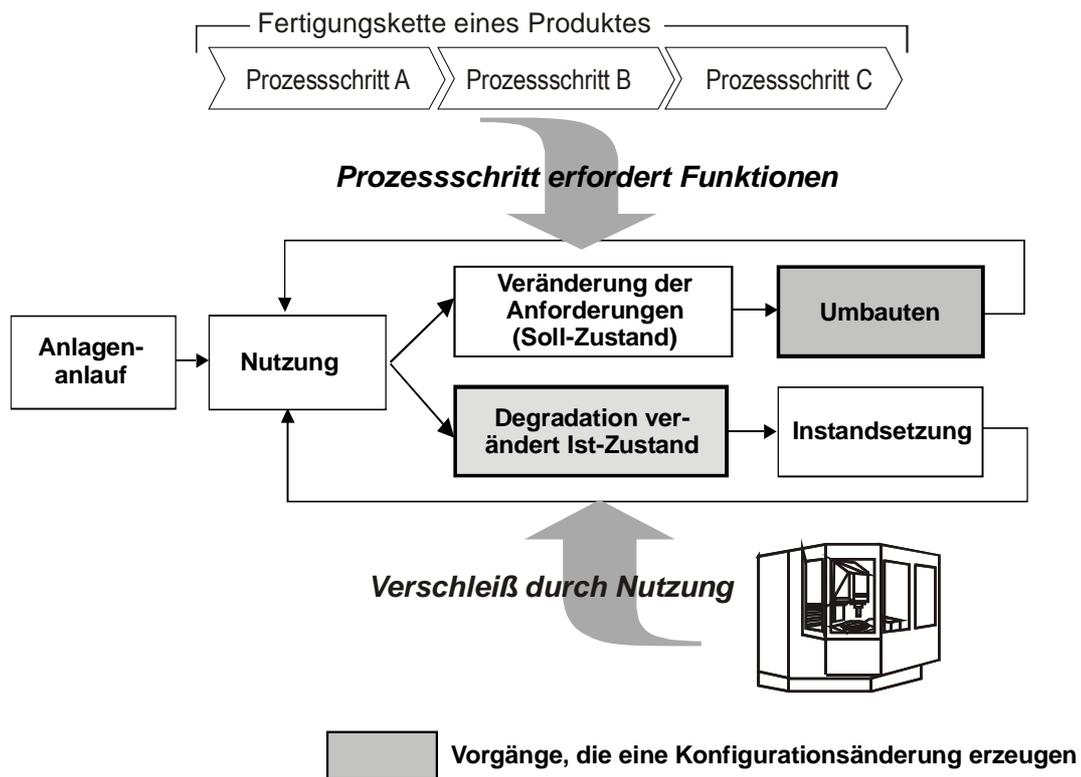


Abbildung 5 Auffassung der Tätigkeiten der Instandhaltung als Konfigurationsmanagement

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Zunächst werden die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Zustandsverfolgung vorgestellt und die in der Arbeit verwendete Terminologie definiert. Dies ist insofern von Bedeutung, als sich daraus ein Instrumentarium von Kriterien zur Bewertung von Instandhaltungsprozessen herausarbeiten lässt, anhand dessen bisher gängige Modelle und Methoden der Instandhaltung beurteilt werden können.

In Kapitel 2 wird darauf aufbauend ein Überblick zum Stand des Wissens gegeben. Es wird sowohl auf die Modelle zur Zustandsdarstellung als auch auf die wesentlichen Methoden zur Ermittlung eines Zustands eingegangen. In einem weiteren Schritt werden die Möglichkeiten zur Bewertung von Zuständen vorgestellt und die bestehenden Probleme für deren Anwendung diskutiert. Bei der Auswahl der Quellen zum Stand des Wissens werden diejenigen Forschungsgebiete ausgewählt, die für den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung relevant sind (Abbildung 6).

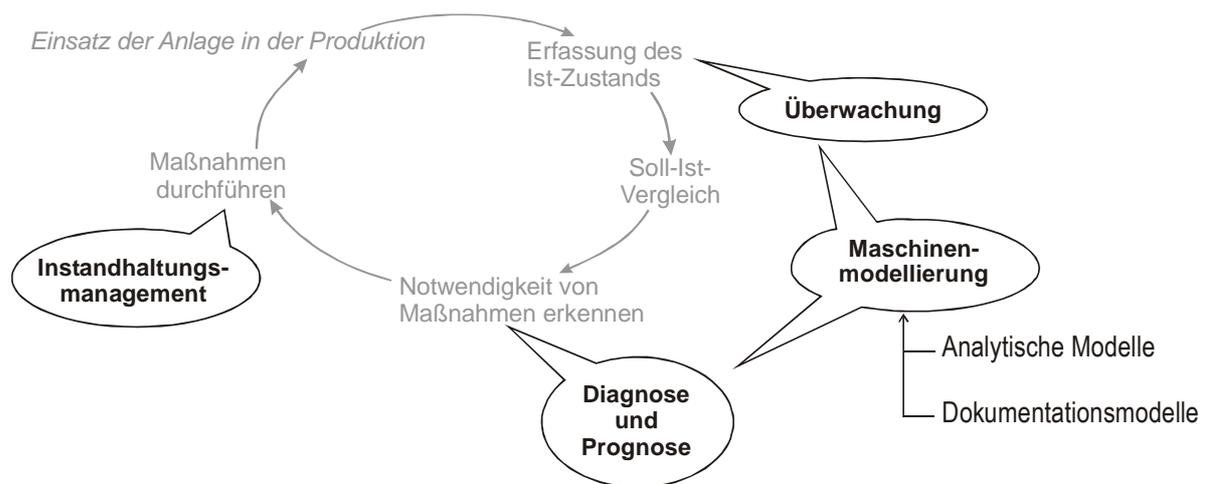


Abbildung 6 Für den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung relevante Forschungsgebiete und Technologien

Vor diesem Hintergrund und den daraus abgeleiteten Unzulänglichkeiten der Zustandsdarstellung für den Einsatz in der Instandhaltung wird in den Kapiteln 3 und 4 eine durchgehende Systematik zur Ableitung von Instandhaltungsmaßnahmen aus Felddaten der Fertigung gegeben. Kapitel 3 erläutert die Voraussetzungen der Anwendung: Festlegung von Soll-Merkmalen und Erfassung von Ist-Merkmalausprägungen. In Kapitel 4 wird die Methode zur Ableitung von Instandhaltungsmaßnahmen erörtert. Dabei werden die einzelnen Methodenschritte anhand eines Szenarios „Spanende Fertigung von Turbinenschaufeln“ verdeutlicht. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der Arbeit kritisch zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Entwicklungen.

1.4 Prämissen der Zustandsverfolgung für Produktionsanlagen

Um eine methodische Zustandsverfolgung zu entwickeln, müssen die Voraussetzungen bekannt sein, unter denen eine erfolgreiche und effiziente Instandhaltungsarbeit möglich ist. In diesem Kapitel werden daher zunächst die Prämissen für eine erfolgreiche Zustandsverfolgung festgelegt. Daran anschließend werden die in der Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten eingeführt und anhand eines Beispiels illustriert. Dieser systematische Überblick erfolgt an dieser Stelle, da aus den Voraussetzungen und Definitionen sich Kriterien ableiten lassen, die eine Bewertung der gängigen Instandhaltungsprozesse, die in Kapitel 2 vorgestellt werden sollen, erlauben.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Zustandsverfolgung ist die Kenntnis eines Zielsystems, aufgrund dessen Instandhalter Entscheidungen fällen und Prioritäten setzen. Dieses Zielsystem wird im wesentlichen durch den Anspruch vorgegeben, das instandzuhaltende Produktionssystem verfügbar zu halten. Den Mitarbeitern der Instandhaltung

muss daher klar sein, welche Anforderungen das Produktionssystem erfüllen muss (Prämisse 1):

Prämisse 1:

Die Anforderungen des Produktionssystems, in das die betrachteten Produktionsanlagen eingebunden sind, müssen explizit abgebildet sein.³

Ändern sich die Anforderungen, z.B. aufgrund von Produktwechseln, so muss sich dies auch in der Abbildung des Produktionssystems widerspiegeln. Nur dann kann der aktuell geforderte Soll-Zustand als Vergleichsmaßstab angelegt werden. Prämisse 2 definiert, dass sowohl Ist- als auch Soll-Zustand verfolgt werden müssen:

Prämisse 2:

Veränderungen des Soll-Zustands müssen ebenso wie Veränderungen des Ist-Zustands erkannt und berücksichtigt werden.

Während der Soll-Zustand geplant und mit abgesicherten Prozessen verändert wird, entstehen Veränderungen des Ist-Zustands häufig unerwünscht. Um diese Veränderungen zügig zu erkennen, muss das System Ist-Zustände kontinuierlich verfolgen (Prämisse 3). Neue Information muss reaktionsschnell zum bestehenden Wissen hinzugefügt und ausgewertet werden, um eine zügige Entscheidungsfindung für Maßnahmen zu ermöglichen.

Prämisse 3:

Die Zustandsverfolgung muss kontinuierlich arbeiten.

Die beständige Erfassung kompletter Zustandsdaten ist außerordentlich aufwändig. So liegen die durchschnittlichen Kosten für eine einmalige Zustandbetrachtung einer Produktionsanlage nach eigenen Erfahrungen bei etwa 1000€. Dabei ist eine Bearbeitungsdauer von etwa 2 Tagen anzusetzen. In diesem Aufwand enthalten ist eine komplette technische Bewertung einer Maschine hinsichtlich ihrer Eignung für einen bestimmten Produktionsprozess, die Ableitung von Maßnahmen und deren kostenmäßige Bewertung. Eine kontinuierliche Zustandsüberwachung muss diesen Aufwand sowohl in zeitlicher als auch monetärer Hinsicht senken, um kostengünstig eine annähernd zustandsorientierte Instandhaltung zu ermöglichen. Für die Zustandsverfolgung müssen daher bestehende Informationsquellen genutzt werden, da zusätzlicher Aufwand nicht zu rechtfertigen wäre (Prämisse 4):

³ Diese Randbedingung deckt sich auch mit den Ergebnissen einer Untersuchung der Erfolgsfaktoren der Einführung eines Instandhaltungsplanungssystems [Hipkin97], ebenso [Warnecke92].

Prämisse 4:

Die Verfolgung des Ist-Zustands muss auf der Basis verfügbarer, aber teilweise unsicherer Felddaten arbeiten können.

1.5 Grundlegende Konzepte

1.5.1 Herleitung des Zustandsbegriffs

Der in den Prämissen unspezifizierte Begriff „Zustand“ muss für die methodische Anwendung präzisiert werden, um ihn anwenden zu können. In diesem Kapitel wird daher ein Produktionssystem gegliedert, entsprechende Begriffe definiert und schließlich eine Definition für „Zustand“ abgeleitet. Inwieweit dieser Zustandsbegriff mit bestehenden Modellen hinterlegt werden kann, wird in Kapitel 2 (Stand des Wissens) überprüft.

Ausgangspunkt ist der Begriff des Produktionssystems. Dieser Begriff bezeichnet die Umwelt, in die jede Maschine in einem Unternehmen eingebettet ist. Das Produktionssystem umfasst so alle produktionstechnischen Beziehungen⁴ zwischen den Einzelanlagen. Für die Gliederung eines Produktionssystems in Teilsysteme wird in dieser Arbeit eine Begriffshierarchie nach Abbildung 7 verwendet. Ein Produktionssystem umfasst eine oder mehrere Produktionslinien. Auf einer Produktionslinie werden ein oder mehrere Produkte gefertigt, indem einzelne Fertigungsschritte jeweils unter Nutzung von Produktionsanlagen der Linie ablaufen. Produktionsanlagen sind z.B. einzelne Werkzeugmaschinen oder Vorrichtungen. Jeder Fertigungsschritt ruft bei der Ausführung Funktionen der Anlage (z.B. „Werkstück spannen“) ab. Mit Hilfe dieser Begriffe wird eine *Fertigungskette* als Sequenz der Nutzung der Produktionsanlagen für ein einzelnes Produkt definiert (Definition 1). Eine Fertigungskette bildet den Durchlauf von Werkstücken durch das Produktionssystem ab. Bemerkenswert an dieser funktionsorientierten Modellierung einer Fertigungskette ist, dass nicht genutzte Funktionen auch nicht modelliert werden.

⁴ Beispiele für produktionstechnische Beziehungen: logische Verkettungen; räumliche Anordnung in der Fertigung; technische Abhängigkeit von Zentralsystemen)

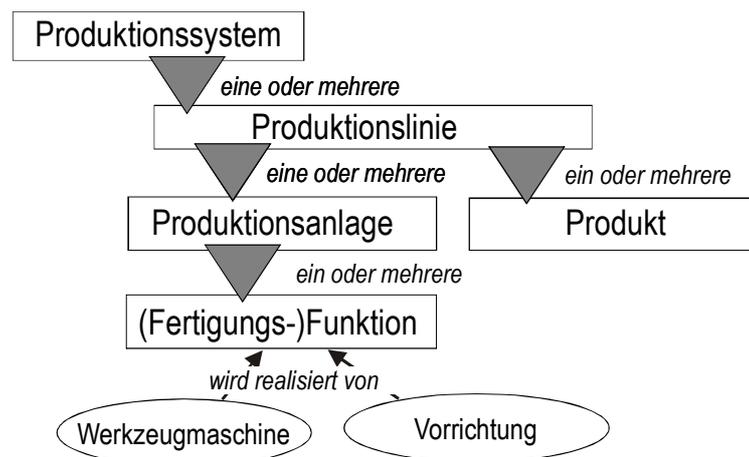


Abbildung 7 Begriffshierarchie: Elemente eines Produktionssystems

Definition 1 **Fertigungskette**

Eine Fertigungskette ist eine Sequenz von Fertigungsfunktionen, die zur Herstellung eines bestimmten Produktes abgearbeitet werden müssen.

Aufgabe der Instandhaltung ist es, Produktionsanlagen zu erkennen, die eine oder mehrere der spezifizierten Funktionen nicht ausführen können. Dieser Fehler kann sich sowohl in Form einer Störung als auch prinzipiell durch eine fehlende Funktion manifestieren. Umgangssprachlich beschreibt man diese Situation als „schlechten Zustand“ einer Anlage.

Eine methodische Unterstützung bei dieser Tätigkeit erfordert eine systematische Abgrenzung der „guten“ von den „schlechten“ Zuständen. In der Umgangssprache sind in den Bezeichnungen „gut“ oder „schlecht“ bereits Bewertungen enthalten: „gut“ bedeutet, dass an einer Produktionsanlage subjektiv keine weiteren Maßnahmen nötig sind. Dieser Zustandsbegriff geht nicht von einer inhärenten Maschineneigenschaft „Zustand“ aus, sondern definiert den Zustand relativ zum betrieblichen Einsatzfeld einer Maschine. Bewertungskriterium ist die Frage, ob eine Maßnahme zur Zustandsverbesserung notwendig erscheint oder nicht. Eine Maßnahme ist objektiv immer dann notwendig, wenn eine Anlage die gestellten Fertigungsaufgaben nicht oder nur ungenügend erfüllen kann. Eine Schleifmaschine ohne Abrichteinrichtung kann zum Beispiel die Fertigungsaufgabe „Flachschleifen mit Continuous Dressing“ nicht erfüllen. Sind jedoch alle Anforderungen aus den in Fertigungsketten beschriebenen Fertigungsaufgaben erfüllt, so ist die Maschine im *geeigneten Zustand*:

Definition 2 Geeigneter Zustand (Effektivität)

Eine Maschine ist im geeigneten Zustand, wenn sie alle Anforderungen der Fertigung erfüllt.

Um die Entscheidung zu treffen, ob eine Maschine alle Anforderungen *erfüllt* oder *nicht erfüllt*, ist eine explizite Beschreibung der zu erfüllenden Anforderungen notwendig. Um eine objektive Bewertung des Zustands zu ermöglichen, müssen die Anforderungen durch mess- oder nachweisbare Merkmale hinterlegt werden. Beispielweise werden für eine Fertigungsaufgabe auf der Produktionsanlage „Schleifmaschine“ die Funktionen „Werkstück spannen“, „Werkstück verfahren“, „Werkzeug antreiben“ und „Continuous Dressing“ genutzt. Diesen Funktionen können nun Merkmale zugeordnet werden, z.B.:

Werkstück spannen	→ Magnetische Spannplatte
Werkzeug antreiben	→ 6000 1/min
Continuous Dressing	→ Zustellung 1 μ /Umdrehung

Genau diese Merkmale bilden die Merkmalsmenge:

Definition 3 Merkmalsmenge (Effizienz)

Die Merkmalsmenge ist die Menge aller Anlagenmerkmale, die zur Zustandsbewertung herangezogen werden.

Jedes Merkmal der Merkmalsmenge ist mit einem Sollwert und einer Ausprägung (Istwert) belegt. Durch Vergleich von Soll und Ist kann die aktuelle Erfüllung eines Merkmales bestimmt werden. Fordert eine Fertigungsaufgabe an der Schleifmaschine ein Zeitspanvolumen $Q > 25 \text{ mm}^3/\text{min}$, dann müssen nutzbare Verfahrgeschwindigkeit und Zustellung entsprechend verfügbar sein. Werden alle Sollwerte tatsächlich erreicht, so ist eine Anlage im hinreichenden Zustand:

Definition 4 Hinreichender Zustand

Eine Produktionsanlage ist im hinreichenden Zustand, wenn alle Elemente der Merkmalsmenge im Zustand „erfüllt“ sind.

Definition 5 *Die Merkmalsmenge einer Produktionsanlage lässt sich in die zwei disjunkten Untermengen **Effektivitätsmerkmale** und **Effizienzmerkmale** unterteilen.*

Effektivitätsmerkmale müssen vorhanden sein, damit die geforderten Funktionen grundsätzlich ausgeführt werden können. Effektivitätsmerkmale stehen typischerweise in direktem Zusammenhang zur Konfiguration der eingesetzten Produktionsmaschine. Ist

zum Beispiel eine Komplettbearbeitung eines Werkstücks mit mehreren Werkzeugen vorgesehen, so ist eine Werkzeugmaschine ohne Werkzeugwechseleinrichtung nicht effektiv. Effektivitätsmerkmale werden häufig im Rahmen einer Anlagenneuplanung erarbeitet; Aggteleky gibt ausführliche Beispiele (Tabelle 1).

Tabelle 1 Beispiele für Effektivitätsmerkmale [nach Aggteleky87]

	Merkmal	Dimension
Leistung Geometrisch	Spitzenweite (Drehmaschine) Format (Druckmaschine)	mm mm × mm
Leistung Physikalisch	Drehzahlbereich Umformdruck	min ⁻¹ MPa
Leistung Ausstattung	Vorschubautomatik Sortiereinrichtung	ja/nein ja/nein
Ergonomische Gestaltung	Anpassung an Körpermaße Lärmemission Kraftaufwand	ja/nein dBA N

Die Wirtschaftlichkeit der Fertigung wird durch die Effizienz der Funktionserfüllung bestimmt. Effizienz ist hier im allgemein gebräuchlichen Sinn als Verhältnis von Aufwand zu Nutzen definiert. Typische Effizienzmerkmale sind zum Beispiel die Nettoproduktivzeit oder Fehlerrate an einem Arbeitsplatz (Tabelle 2).

Tabelle 2 Beispiele für Effizienzmerkmale [nach Aggteleky87]

	Merkmal	Dimension
Leistung Genauigkeit	Toleranzeinhaltung Ausschussquote	% ppm
Verfügbarkeit	Ausfallrate	s ⁻¹
Logistische Leistung	min. Bearbeitungszeit etc.	s, min

Weichen Ist- und Sollwert eines Merkmals voneinander ab, so muss dieser Mangel durch eine Instandhaltungsmaßnahme, ein *Anliegen*, behoben werden.

Definition 6 Anliegen⁵

Ein Anliegen ist eine Maßnahme, die der Wiederherstellung oder Aufrechterhaltung des hinreichenden Maschinenzustands gilt.

Ein Anliegen kann beispielsweise eine einfache Störungsmeldung sein, die besagt, dass an einer Werkzeugmaschine das Messsystem ausgefallen ist. Entsprechend ist eine Instandhaltungs-Maßnahme aufzusetzen, deren Inhalt „Messsystem reparieren“ ist. Ein Anliegen kann jedoch auch entstehen, wenn eine Änderung der Anforderungen dazu führte, dass die aktuelle Maschinenkonfiguration die geforderten Funktionen nicht erfüllen kann.

Ein Anliegen wird durch einen innerbetrieblichen Prozess dargestellt. Innerhalb dieses Prozesses werden alle operativen Instandhaltungstätigkeiten innerhalb von 5 Phasen abgearbeitet (Tabelle 3). Die ersten beiden Phasen dienen dabei der Entdeckung und Bewertung der jeweiligen Soll-Ist-Abweichung. In Phase 1 wird eine potentielle Schwachstelle erkannt und für die weitere Bearbeitung als relevant eingestuft. In der zweiten Phase wird für das erkannte Problem eine Lösung entwickelt und bewertet. In beiden Phasen können sich Anliegen als undurchführbar oder unwirtschaftlich herausstellen, daher sind Entscheidungen durch das Instandhaltungs-Management notwendig, ob das Anliegen weiter verfolgt werden soll. Ab Phase 3 liegt eine kosten- und terminmäßig bewertete Planung vor, die in einen konventionellen Instandhaltungsauftrag (Phasen 4 und 5) überführt werden kann.

Die Phasen 1 und 2 sind wesentlich für den Erfolg der gesamten Instandhaltungstätigkeit. In Phase 1 werden die Risiken und offenen Punkte erkannt, die den sicheren Betrieb gefährden. Phase 2 dient dem Erkennen von Chancen, deren Umsetzung zu einer Verbesserung des Produktionssystems führen würde. Die Kenntnis dieses Chancen-Risiko-Profiles ist eine der wichtigsten Instrumente der Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Maßnahmen und Investitionen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dieser grundlegenden Prozess „Anliegen“ in zwei Argumentationsebenen angewandt: Erstens in der Ebene der operativen Instandhaltung. Hier stellt sich die Frage, wie kann frühzeitig erkannt werden, dass ein Anliegen vorliegt. Zweitens wird der Anliegensprozess verwendet, um Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (im Anliegensprozess) zu bewerten.

⁵ Deutsche Entsprechung des englischen „issue“.

Tabelle 3 Entwicklungsphasen eines Anliegens

<i>Phase</i>	<i>Kenntnisstand</i>	<i>Phasen- ergebnis</i>	<i>Phasen- charakter</i>
1. Entdeckung	Potentielle Schwachstelle lokalisiert	Handlungsbedarf bestätigt	Prüfauftrag
2. Lösungsansätze	Lösung(en) zur Elimination der Schwachstelle entwickelt	Bewertung fertig	
3. Umsetzung geplant	Lösungsansätze termin- und kostenmäßig bewertet, Terminplan abgestimmt	Lösung ausgewählt	Entscheidung
4. Umsetzung	Abarbeitung der Maßnahme	Umgesetzt	Instandhaltungsauftrag
5. Dokumentation	Lösung erprobt, Neuerlicher Soll-Ist-Vergleich erfolgt, Konsolidierung der Erfahrung	Erfolg bewertet	

1.5.2 Abgrenzung von Überwachung und Diagnose

Die Erfassung und Bewertung von Zuständen ist eng verknüpft mit den technischen Möglichkeiten, die Überwachung und Diagnose bieten (Abbildung 8). Unter Überwachung und Diagnose wird die Erfassung von Merkmalswerten und deren Deutung verstanden. Da bei der Gestaltung von Überwachungs- und Diagnosesystemen häufig keine klare Trennung beider Begriffe möglich ist, werden in dieser Arbeit die Konzepte⁶ nach Gertler eingesetzt [Gertler98].

Definition 7 **Überwachung** (*fault detection*⁷)

Überwachung ist die Erfassung der Ausprägung von Merkmalen zu einem Zeitpunkt.

*Die Ausprägung eines Anlagenmerkmals, die auf einen Fehlerzustand hindeutet, heißt **Symptom**.*

⁶ Im Qualitätsmanagement werden die gleichen Konzepte anders benannt: Überwachung ist Messen, Diagnose ist Prüfen und Bewertung ist eine Entscheidung über Gut/Schlechtteil.

⁷ In Klammern jeweils die englischen Begriffe der Quelle.

Definition 8 Diagnose (fault isolation)

Diagnose ist die Erarbeitung einer stichhaltigen Begründung für die erkannte Ausprägung der Merkmale (Symptome)⁸.

Definition 9 Bewertung (fault identification)

Bewertung ist der Vergleich der Merkmalsausprägungen verschiedener Einheiten untereinander, um sie entsprechend einer Rangfolge zu ordnen.

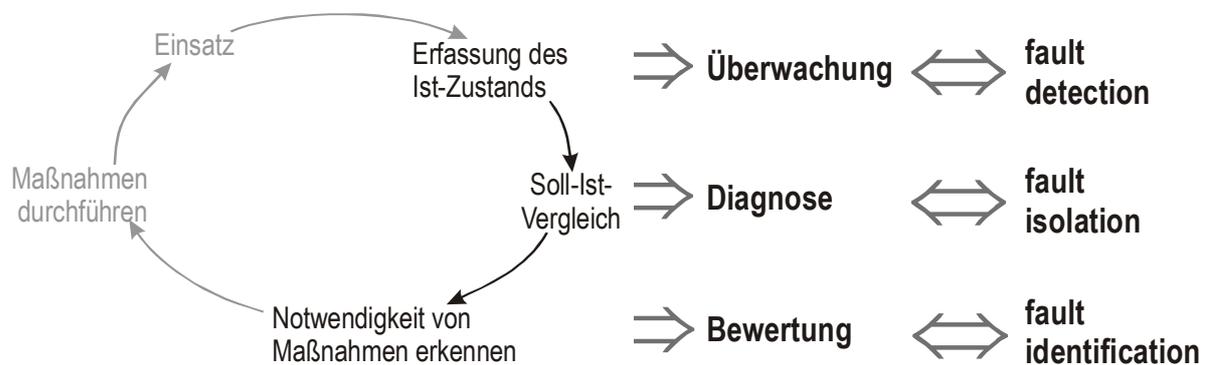


Abbildung 8 Tätigkeiten der Überwachung und Diagnose eingeordnet in den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung

⁸ Der Diagnosebegriff geht dabei implizit von einem Fehlerzustand aus, für den eine Ursache gefunden werden muss.

2 *Stand des Wissens*

Die sich mit der Zeit verändernden Merkmale und Eigenschaften von Produktionsmaschinen werden durch die Instandhaltung beobachtet, um aus diesen Beobachtungen Maßnahmenbedarf abzuleiten. Dieses Beobachten, die *Zustandsverfolgung*, ist ein Teil der Arbeit des Instandhaltungsmanagements und fest eingebunden in den Tätigkeitszyklus der Instandhaltung (Abbildung 1). Während des Durchlaufs durch diesen Zyklus werden systematisch verschiedene Techniken und Methoden angewandt, die zur Ermittlung oder Bewertung des Maschinenzustands beitragen.

Im diesem Kapitel soll ein Überblick über die gängigsten Methoden der Zustandsverfolgung gegeben werden, die Methoden sollen ferner im Hinblick auf die in Kapitel 1.4 aufgestellten Prämissen beurteilt werden. Die Methoden werden dazu in die drei Kategorien Zustandsmodellierung, Überwachung – Diagnose und Zustandsbewertung eingeteilt.

Es werden dabei sowohl analytische Modelle wie das Boole'sche Modell als auch die Dokumentationsmodelle im Sinne des Produktdatenmanagements betrachtet. Beide Modellarten bilden gemeinsam die notwendigen theoretischen Grundlagen zur Abbildung von Produktionsanlagen im Rechner („virtuelle Werkzeugmaschine“).

2.1 **Darstellung von Zuständen: Zustandsmodellierung**

Nach [DIN 40041] ist der Begriff Zustand als *die Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte einer Einheit zum Betrachtungszeitpunkt* definiert. Dieser Begriff nach DIN kann in der in Kapitel 1.5 erarbeiteten Begriffswelt als „Merkmalsmenge plus Ist-Auspägung“ wiedergefunden werden. Damit ist klar, dass die DIN keine Zustandsbewertung vornimmt.

Die Phrase „Gesamtheit der Merkmale“ deutet weiter drauf hin, dass Zustand ein aus unterschiedlichen messbaren Größen zusammengesetzter Begriff ist. Diese Größen sind jedoch nicht zwingend zueinander „kompatibel“, es gibt keine gemeinsame Dimension, in der ein Zustandswert dargestellt werden kann. Jede Messgröße ist einem As-

pekt des Zustands zugeordnet. Eine Zusammenstellung von Zustandsaspekten erarbeitete Günther (Tabelle 4).

Eine vollständige Zustandsbestimmung erfordert die simultane Erfassung aller Aspekte. Ebenso müssen alle Merkmalsausprägungen gleichzeitig bestimmt werden. Da jedoch die Aspekte voneinander unabhängig sind, entstehen beim Versuch, eine einheitliche Zustandsaussage zu treffen, häufig widersprüchliche Aussagen. Beispielsweise kann der Abnutzungszustand „abgenutzt“ sein, der Qualitätszustand jedoch weiterhin „gut“ beurteilt werden. Zustand ist also eine mehrdimensionale Größe. Um über die Notwendigkeit von Maßnahmen zu entscheiden, müssen mehrere Zustandsaspekte betrachtet und gegeneinander abgewogen werden.

Tabelle 4 Aspekte des Zustands von Produktionsanlagen nach [Günther99]

Zweck, Zielsetzung	Zustandsaspekt	Messgröße (Beispiel)
Fortschritt der Abnutzung	Abnutzungszustand	Risslänge Schichtdicke
Störungen des Betriebsablaufes	Betriebszustand	SPS-Meldungen Störungsmeldungen
Produktionsleistung	Leistungszustand	Produktionsmenge
Produktqualität	Qualitätszustand	Maßhaltigkeit Ausschussquote

Um mehrere Zustandsaspekte simultan darzustellen, kann das Konzept eines Zustandsraumes angewandt werden. Ein Zustandsraum ist ein n -dimensionaler Raum, in dem jede Dimension jeweils einen Zustandsaspekt darstellt. Jeder Punkt des Zustandsraums bestimmt eindeutig einen Zustand. Um zwei Zustände a, b qualitativ vergleichen und bewerten zu können, ist für jede Dimension die Definition einer transitiven Ordnungsrelation $\Omega(a, b)$ notwendig, die die Zustände in einer besser-schlechter-Relation ordnet. Ist zusätzlich eine Metrik $\|\Omega(a, b)\|$ definiert, so können zwei Zustände quantitativ verglichen werden. Diese Bedingungen erfüllt der von Niemeier vorgestellte Prozesszustandsvektor (Abbildung 9). Er umfasst die Dimensionen Abnutzungszustand, Leistungszustand und Qualitätszustand [Niemeier01]. Statt den Zustand in einer physikalischen Dimension darzustellen (z.B. mm für den Abnutzungsfortschritt), stellt Niemeier über eine Verlustfunktion (vgl. hierzu [Taguchi89]) die Bedeutung des aktuellen Zustands für den Fertigungsprozess dar.

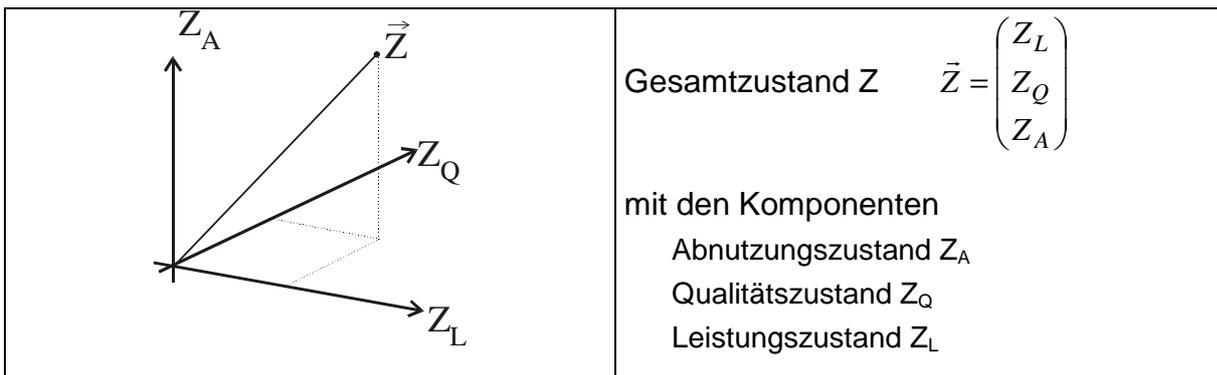


Abbildung 9 Zustandsraum nach [Niemeier01], schematisch

Kececioglu entwarf eine hierarchische Gliederung der Zustandsaspekte. Spitze dieser Hierarchie ist der Begriff *System Effectiveness*⁹, der weiter in *Operational Readiness*, *Mission Reliability* und *Design Adequacy* gegliedert wird (Abbildung 10) [Kececioglu95]. Operational Readiness entspricht im wesentlichen der Verfügbarkeit. Dieser in der Produktionstechnik übliche Effizienzbegriff wird allerdings erweitert: Design Adequacy beschreibt, ob ein System eine gewünschte Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen erfolgreich ausführen wird. Mission Reliability beschreibt, ob diese Aufgabe ohne Störungen ausgeführt wird. Alle drei Begriffe sind Wahrscheinlichkeitsgrößen, die in der Wehrtechnik geläufig sind. Für die Instandhaltung in der Produktion könnte eine Anwendung erfolgen, indem unter Design Adequacy die Wahrscheinlichkeit verstanden wird, dass ein Produkt fehlerfrei (im Sinne der Produktqualität) gefertigt wird. Mission Reliability wäre die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produktionsauftrag störungsfrei durchläuft. Der Wahrscheinlichkeitswert für Operational Readiness beruht auf einer Betrachtung von Zeitgrößen, die auch in der Produktion üblich ist.

Diese Begriffshierarchie zeigt Analogien zu den Dimensionen des Zustandsraumes. Sie könnte daher ein Ansatz sein, die verschiedenen Dimensionen von Zustand durch Wahrscheinlichkeiten zu quantifizieren. Da jedoch von Kececioglu keine Methoden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte von Design Adequacy und Mission Reliability angegeben werden, ist eine unmittelbare Übertragung auf die Produktionstechnik nicht möglich.

⁹ Die Begriffe nach Kececioglu wurden nicht übersetzt, um Eindeutigkeit zu ermöglichen. Deutsche und englische Begriffe bezeichnen in dieser Arbeit unterschiedliche Konzepte.

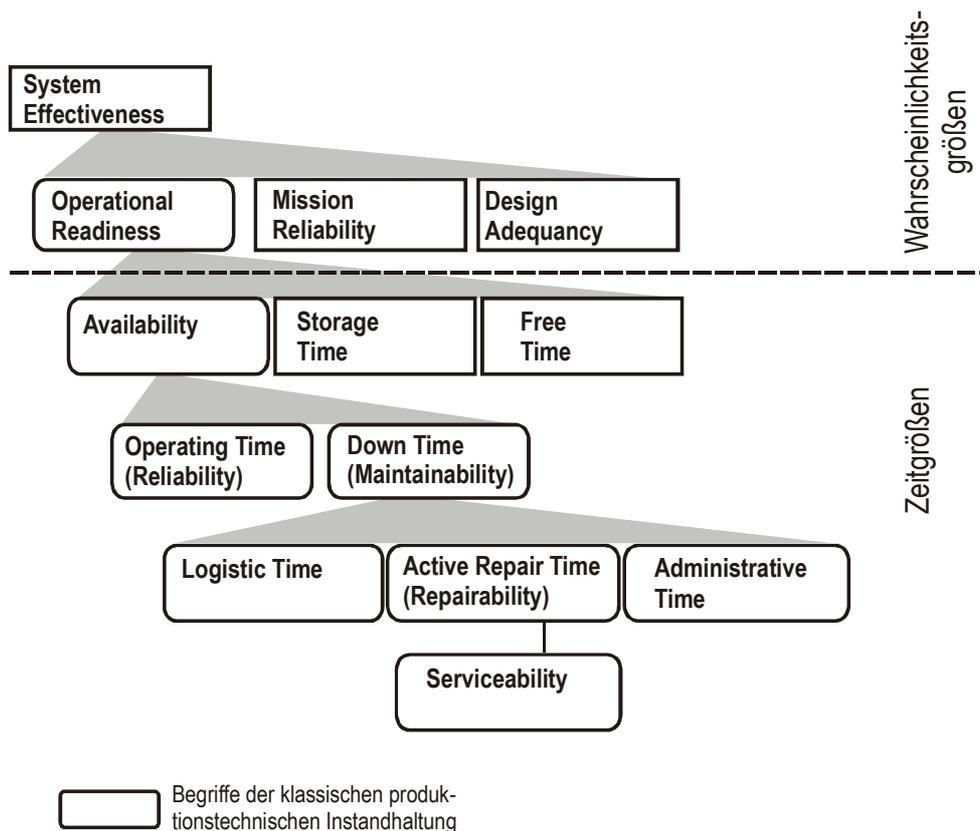


Abbildung 10 Gliederung des Begriffs System Effektivness nach [Kececioglu95].

2.1.1 Zustandsmodelle für Black-Box-Systeme

In diesem Unterkapitel werden vier ausgewählte Modelle zur Beschreibung des Zustands eines Black-Box-Systems vorgestellt. Das Innenleben der betrachteten Modelle spielt dabei keine Rolle, lediglich der an den Systemgrenzen erkennbare Zustand wird betrachtet. Es stellt die vier gängigen Konzepte (Abnutzungsvorrat, Maschinenfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz) vor, die zur ganzheitlichen Beurteilung von Produktionsanlagen herangezogen werden. Nahezu alle praktischen Bewertungstechniken stützen sich auf eines dieser Konzepte.

2.1.1.1 Modell des Abnutzungsvorrats

Das Zustandsmodell des Abnutzungsvorrats basiert auf der Annahme, dass ein technisches System fehlerfrei funktioniert, wenn die physikalischen Merkmale aller Elemente innerhalb definierter Toleranzen liegen. Diese Grenzen werden bereits beim Systementwurf bestimmt, indem für die erwartete Abnutzung ein entsprechender Aufschlag einkalkuliert wird. Am Beispiel Verschleiß ist der Abnutzungsvorrat gut darzustellen (Abbildung 11). Das System ist funktionsfähig, solange der Wellenstumpfdurchmesser

d_{ist} größer als d_{grenz} bleibt. Ist der Abnutzungsvorrat verbraucht ($d_{ist} \leq d_{eingriff}$), muss eine Instandhaltungsmaßnahme eingeleitet werden, die den Abnutzungsvorrat wieder restauriert.

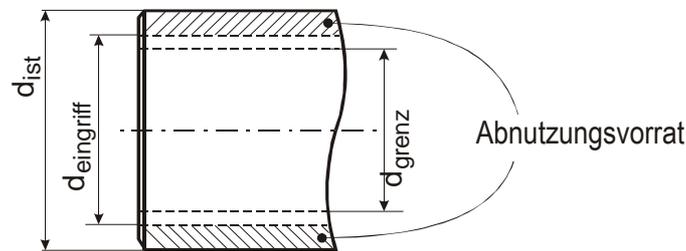


Abbildung 11 Abnutzungsvorrat am Beispiel eines Wellenstumpfes

Für die Anwendung dieses Modells in der zustandsorientierten Instandhaltung wird eine Abnutzungskurve angesetzt (Abbildung 12). Mit Hilfe dieser Kurve wird der Rest-Abnutzungsvorrat antizipiert, und es werden rechtzeitig Maßnahmen eingeleitet [Eichler82]. Die zeitgerecht ausgeführten Instandhaltungsmaßnahmen stellen den ursprünglichen Abnutzungsvorrat wieder her und der Zyklus beginnt erneut. Zülch schlägt eine Technik vor, die auf vordefinierten Verläufen der Abnutzungskurven basiert und den aktuellen Stand des Abnutzungsvorrats simulationsgestützt ermittelt [Zülch01]. Neumann et al. entwickelten für elektrische Energieversorgungssysteme das Konzept der Schädigungspläne. Schädigungspläne sind diskrete Abnutzungskurven, die beschreiben, wie einzelne Schädigungszustände eines Instandhaltungsobjektes durch Degradation ineinander übergehen. Anhand dieser Pläne sorgt die Instandhaltung dafür, dass ein Instandhaltungsobjekt nie in den Zustand „Schadensgrenze erreicht“ eintreten kann [Neumann97].

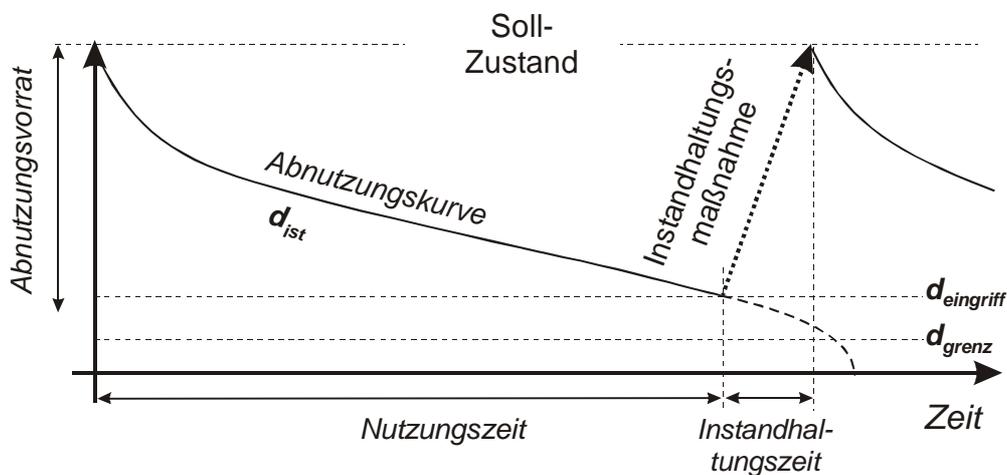


Abbildung 12 Zeitverlauf des Abnutzungsvorrats, siehe auch Abbildung 11

Das System basiert allerdings auf der Kenntnis der Schädigungspläne, die für Produktionsanlagen bislang nicht anzugeben sind. Um in der Praxis auf dem Konzept des Abnutzungsvorrats eine zustandsorientierte Instandhaltung zu realisieren, müssen sämtliche relevanten Abnutzungskurven bekannt sein. Deren Bestimmung gestaltet sich in der Praxis schwierig, wenn nicht sogar unausführbar, da die Kurven bauteilspezifisch sind und probabilistischen Effekten unterliegen. Der Verlauf einer Abnutzungskurve wird zudem durch Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst. Nur bei reinem Austauschbau wird der Soll-Zustand immer zu 100% wiederhergestellt. Werden Bauteile dagegen „nur“ ausgebessert oder durch verschleißfestere Teile getauscht, muss eine neue Abnutzungskurve angesetzt werden. Maschinenumbauten zur Leistungssteigerung zielen auf die Verlängerung der Nutzungszeit ab, so dass eine Fortschreibung des Abnutzungsvorrats außerordentlich aufwändig wird. Zudem können mechanische Systeme auch nach Überschreiten der Eingriffsgrenze funktionsfähig sein. Kettentriebe können beispielsweise trotz gelängter Kette und verschlissenen Kettenrädern zufriedenstellend arbeiten.

2.1.1.2 Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit

Um die technische Leistungsfähigkeit einer Produktionsmaschine zu beurteilen, werden die Kennzahlen *Maschinenfähigkeit* C_m und *Prozessfähigkeit* C_p verwendet. Die Beurteilung erfolgt dabei indirekt durch Bearbeitungsversuche, das Urteil wird anhand des erzielten Bearbeitungsergebnisses begründet [Hanrath94, Tönshoff95]. Für diese Versuche werden Werkstücke aus dem realen Produktspektrum des späteren Einsatzes der Produktionsanlage verwendet. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Aussagen dient die Maschinenfähigkeit C_m dabei der *Maschinenauswahl*, die Prozessfähigkeit dagegen der *Beobachtung* der Maschineneigenschaften (Tabelle 5).

Tabelle 5 Gegenüberstellung von Maschinen- und Prozessfähigkeit [nach Weck92]

	Maschinenfähigkeit	Prozessfähigkeit
Formelzeichen	C_m, C_{mk}	C_p, C_{pk}
Einsatzzweck	Erfassung der kurzzeitigen Streuung des Bearbeitungsergebnis unter gleichbleibenden Randbedingungen.	Erfassung der langfristigen Streuung des Bearbeitungsergebnis unter realen Prozessbedingungen.
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Betriebswarme Maschine - Ein Werkzeug - Eine Rohteilcharge - Keine äußeren Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Reale Prozessbedingungen - Reales Prozessumfeld

Spring stellt den Prozessfähigkeitsindex $C_{p(ind)}$ vor, der bei Werten größer 1 die Wahrscheinlichkeit eines stabilen Prozesses anzeigt [Spring91]. Die langfristig ermittelte Kennzahl Prozessfähigkeit kann über statistische Prozesskontrolle (SPC) abgeschätzt werden [z.B. Rabe93].

Stark weist jedoch darauf hin, dass diese Abschätzung unter dem systematischen Problem leidet, einen konstanten Erwartungswert für C_p anzusetzen [Stark91]. Da für eine instandhaltungsorientierte Zustandsbewertung gerade diese zeitliche Veränderung von C_p relevant ist, müssten für eine Anwendung die mathematisch-statistischen Grundlagen abgewandelt formuliert werden.

2.1.1.3 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Abnutzungsvorrat und Fähigkeitskennzahlen beziehen sich vorrangig auf den physikalischen Zustand einer Produktionsmaschine. In der Dimension Zeit können jedoch unabhängig von Abnutzung und Fähigkeitskennzahl die Zustände *betriebsbereit* oder *nicht betriebsbereit* unterschieden werden (Abbildung 13). Ein *Ausfall* ist dabei der Zustandsübergang von betriebsbereit zu nicht betriebsbereit.

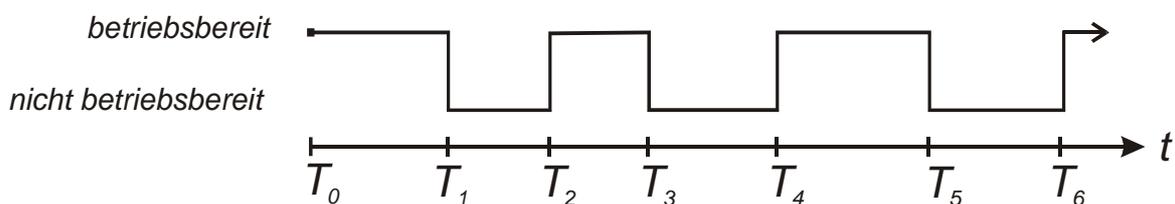


Abbildung 13 Zeitliche Struktur der Betriebsbereitschaft

Um die zeitliche Struktur dieser Zustandsdualität zu beschreiben, sind in Zuverlässigkeitstechnik und Verfügbarkeitsanalyse eine Reihe von Kennzahlen definiert. (u.a. [VDI2893], [VDI4004]). Die meistbeachtete und -diskutierte Kennzahl ist die Verfügbarkeit A (Availability), die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der an einer Betrachtungseinheit zur Betrachtungszeit keine als maßgeblich geltenden Störungen vorliegen, die unter den vorauszusetzenden Bedingungen die Erfüllung einer Funktion verhindern [DIN40044]. Sie ist definiert als Quotient störungsfreier Laufzeit T_B und Anwendungsdauer T_N (Gl. 1).

$$A = \frac{T_B}{T_N} \quad (\text{Gl. 1})$$

DIN40041 definiert die Anwendungsdauer T_N nicht weiter, ein Grund für die in der Praxis häufigen Dispute. Erst die Richtlinie [VDI4004] präzisiert, welche Einflussgrößen zu berücksichtigen sind. Entsprechend der berücksichtigten Einflüsse werden dann verschiedene Unterarten des Verfügbarkeitsbegriffs unterschieden (Abbildung 14).

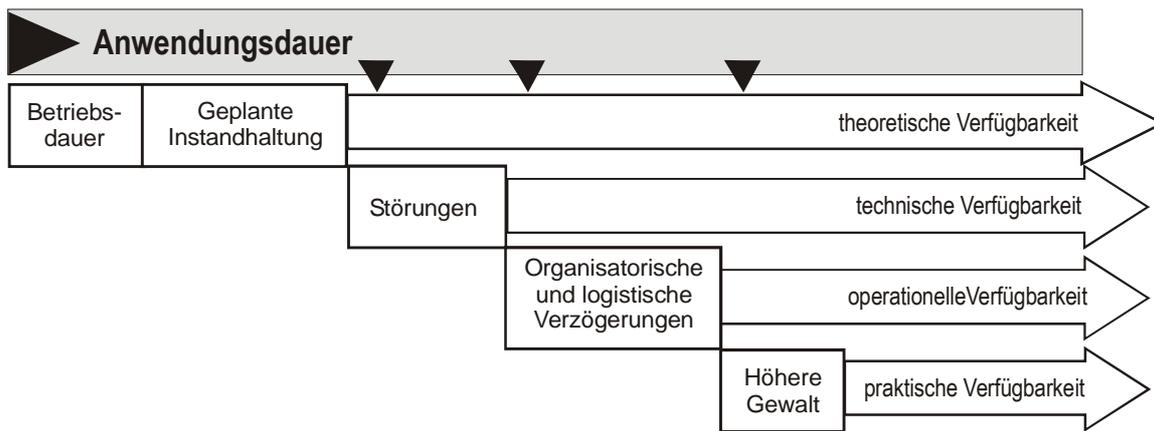


Abbildung 14 Verfügbarkeiten nach VDI4004; nach [Köhrmann00]

Die Verfügbarkeit beschreibt, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, ein System zu einem beliebigen Zeitpunkt fehlerfrei anzutreffen, unabhängig davon, ob es bis zu diesem Zeitpunkt bereits ausgefallen ist oder nicht. Die Wahrscheinlichkeit, ob ein System zu einem Zeitpunkt t ausfallen wird, beschreibt hingegen die Ausfallrate λ . λ ist eine stochastische, zeitabhängige Größe. Der Verlauf der Ausfallrate $\lambda(t)$ über die Zeit einem empirisch ermittelten Verlauf, der sogenannten Badewannenkurve (Abbildung 15). Nur im Bereich II wird die Ausfallrate als konstant angesehen. Während dieser Phase des Lebenszyklus ist das Betriebsverhalten stabil und für Ausfallrate und MTBF gilt Gleichung 3. In Bereich II zeigt die Stichprobe für λ eine Normalverteilung. Wird eine analytische Behandlung über alle Bereiche der Ausfallrate gewünscht, so muss an dieser Stelle eine empirisch ermittelte Weibull-Verteilung für λ angesetzt werden [Bertsche99].

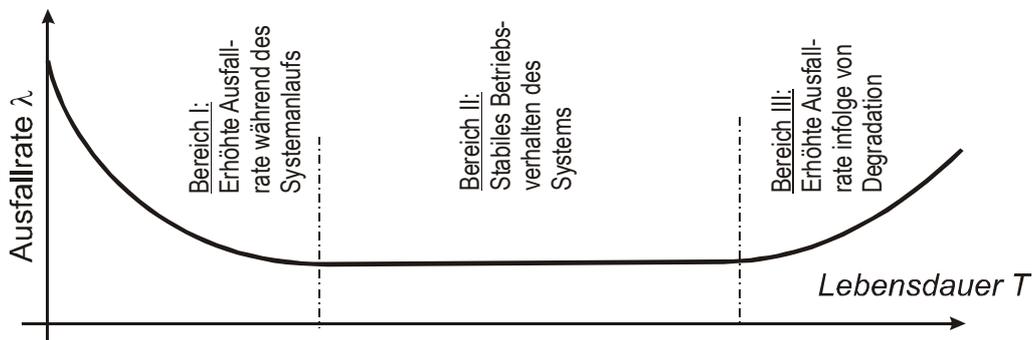


Abbildung 15 Verlauf der Ausfallrate $\lambda(t)$ über die Zeit

Im Bereich II ($\lambda = \text{const}$) gilt
$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Gl. 2})$$

Analog zu dieser Betrachtung kann der Betriebszustand „nicht betriebsbereit“ untersucht werden, dessen wesentliche Kenngrößen *Mean Time To Repair* (MTTR) und *Instandhaltbarkeit* μ sind¹⁰. Sind sowohl Ausfallrate als auch Instandhaltbarkeit bekannt, kann die theoretische Verfügbarkeit A_{th} nach Gl. 3 berechnet werden.

$$A_{th} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (\text{Gl. 3})$$

Ausfallraten sind in der Literatur vor allem für elektronische Bauteile angegeben, die hier zwischen 10^{-9} 1/h und 10^{-7} 1/h liegen [Biolini97]. Für einfache Maschinenelemente wie Wellen, Lager und Zahnräder sind ebenfalls Berechnungsmethoden für Zuverlässigkeitskennwerte bekannt [Bertsche99].

Für komplexe Maschinenelemente, wie z.B. Linearantriebe, sind Zuverlässigkeitskennzahlen jedoch noch nicht bekannt. In den üblichen Lebensdauermodellen sind auch Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen Alterung und Betriebsbedingungen sowie Instandhaltungsmaßnahmen nicht berücksichtigt. [Martorell99] diskutiert hier einen Ansatz, der diese Faktoren einbezieht. Eine Zustandsbewertung auf Basis von λ_{SOLL} und λ_{IST} ist jedoch mit dem heutigen Wissen in der Praxis nicht durchzuführen.

2.1.1.4 Effizienzbeurteilung

Um die Leistung einer Produktionsanlage ganzheitlich zu bewerten, wird in der Praxis das Verhältnis von produktiver zu unproduktiver Zeit einer Produktionsmaschine betrachtet. Zu diesem Zweck entwickelte Nakajima das Konzept der *Overall Equipment Efficiency* (OEE), deren Kennzahlen die Nettoproduktivzeit T_P und Anlageneffizienz E_A sind (Gl. 4) [Nakajima88].

$$\begin{aligned} \text{Nettoproduktivzeit } T_P = \\ \text{Verfügbarkeitsdauer} - \text{geplante Stillstandszeit} - \\ \text{Rüstzeit} - \text{Stillstandszeit} - \text{Verlust durch Prozessfehler} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Anlageneffizienz E_A ist definiert als Anteil der Nettoproduktivzeit im Beobachtungsintervall t_0, t_1 (Gl. 5).

$$E_A = \frac{T_P}{t_1 - t_0} \quad (\text{Gl. 5})$$

¹⁰ μ ist die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Reparatur innerhalb einer bestimmten Zeit beendet wird.

Die Dimension aller Summanden in Gl. 6 ist Zeit. Die Anlageneffizienz gibt daher, wie auch Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, keine Auskunft über den technischen Zustand einer Anlage. Ebenso bleibt infolge der einfachen Berechnung als Summe auch die stochastische Streuung, denen Zustandskennzahlen immer unterliegen, unbestimmt. Die Anlageneffizienz sollte daher eher als Trendindikator und nicht als absolute Bewertungskennzahl wahrgenommen werden.

Nakajima geht weiterhin davon aus, dass eine Instandhaltungsmaßnahme nützlich war, wenn sie zur Steigerung der Nettoproduktivzeit führt. Jedoch kann zum Beispiel durch Vernachlässigen von Wartungsarbeiten die Anlageneffizienz verbessert werden („*Betrieb auf Teufel komm ´raus*“). Der Gesamtzustand einer Produktionsanlage wird durch ein solches Vorgehen jedoch nicht verbessert.

2.1.2 Zustandsmodelle für zusammengesetzte Systeme

In diesem Unterkapitel werden Modellierungsansätze für zusammengesetzte Systeme vorgestellt. Diese Modelle gliedern Systeme in Komponenten und schließen aus den einzelnen Komponentenzuständen auf den Zustand des Gesamtsystems. Jede der Komponenten ist dann eine Betrachtungseinheit (ein Instandhaltungsobjekt), deren Merkmale einzeln beobachtet werden können. Durch diese Gliederung können Aufgaben von planbarem Umfang definiert werden.

Die komponentenbasierte Modellierung des technischen Verhaltens einer Produktionsanlage ist noch wenig fortgeschritten. Hier ist die wesentliche Hürde, den Übergang von der Beschreibung des Verhaltens einzelner Komponenten zum komplexen Verhalten des mechanischen Systems Produktionsanlage zu erreichen.

Die Methoden zur Modellierung der Zuverlässigkeit dienen einerseits der analytischen Berechnung der zu erwartenden Verfügbarkeit, andererseits der Bestimmung von Ursachen und Folgen für einen Fehlerzustand. Sie lassen sich in *erfahrungsbasierte* und *statistische* Methoden einteilen (Abbildung 16). Während die erfahrungsbasierten Methoden ein systematisches Durchdenken möglicher Fehler und deren Ursache fördern, basieren die statistischen Methoden auf einer mathematisch geschlossenen Modellierung des untersuchten Systems. Allen Modellen ist das Konzept des *Fehlerzustands* (*failure mode*) gemein: Ein Fehlerzustand ist ein Systemzustand, in dem das betrachtete System nicht oder nur noch eingeschränkt funktionstüchtig ist.

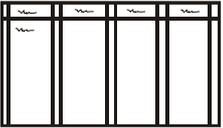
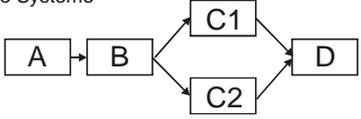
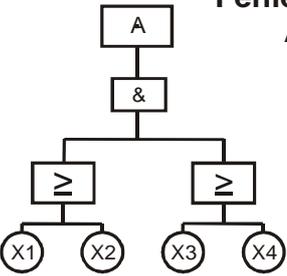
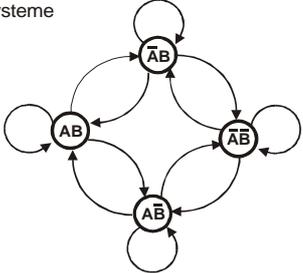
Zustandsmodelle für zusammengesetzte Systeme	
Systematische, erfahrungsbasierte Suche nach Schwachstellen und ihren Auswirkungen	Ermittlung des Ausfallverhaltens mit Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie
 <p>FMEA und FMECA</p>	<p>Bool'sche Theorie Nicht-Reparierbare Systeme</p> 
<p>Fehlerbaum-Analyse</p> 	<p>Markov-Theorie Reparierbare Systeme</p> 

Abbildung 16 Gliederung der Zuverlässigkeitsmodelle für technische Systeme
 FMEA: Failure Mode and Effects Analysis
 FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)

2.1.2.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) und Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) sind systematisierte Vorgehensweisen, um potentielle Fehlerzustände eines Systems frühzeitig aufzudecken [DIN25488, EN 61508]. Ursprünglich in der Luftfahrtindustrie entwickelt, werden beide Methoden heute für sicherheitskritische Systeme angewandt und sind gelegentlich Teil von Zulieferverträgen [Ford88].

Bei einer FMEA wird eine systematische Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und Funktionen eines technischen Systems vorgenommen. Der stark formalisierte methodische Rahmen stellt sicher, dass die Analyse vollständig durchgeführt wird. Dazu ist ein erheblicher Aufwand notwendig, Schmidt gibt für die FMEA eines Werkzeugwechslers eine Bearbeitungszeit von 7 Personenmonaten¹¹ an [Schmidt91]. Nach eigenen Erfahrungen ist insbesondere die Entwicklung einer Funktionsstruktur

¹¹ Es wird hier von einem Team mit 7 Mitgliedern ausgegangen, die 4 Wochen durchgängig an einer FMEA arbeiten.

sehr aufwändig, da in vielen Fällen weder entsprechendes Methodenwissen noch Richtlinien in Unternehmen existieren.

Nach einer Untersuchung des Vereins deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) nutzte 1992 nur einer von 15 Werkzeugmaschinenherstellern die FMEA [VDW92]. Alle Unternehmen betonen jedoch ihren langfristigen Nutzen, da die strenge Systematik eine gut strukturierte Dokumentation von Entwicklungsprojekten fördert. Vielfach wird Detailwissen eines einzelnen Konstrukteurs während eines FMEA-Workshops erstmalig erfasst und systematisch dokumentiert. Hier setzen in der Forschung entwickelte, rechnerbasierte FMEA-Systeme an und fördern die breitere Nutzung dieses Wissens [Müller94, Nedeß93, Pfeifer93, Wirth93]. Zöllner beschreibt, wie eine FMEA effizient in ein Online-Fehlerdiagnosesystem für Montageanlagen der Elektronikproduktion überführt werden kann [Zöllner95]. Trotz dieser vielversprechenden Ansätze hat sich bis jetzt die Anwendung einer FMEA in der Instandhaltung nicht durchgesetzt. Dies ist unter anderem auf die mangelnde Verfügbarkeit entsprechend aufbereiteter Dokumentationen zurückzuführen.

2.1.2.2 Fehlerbaum-Analyse

Die Fehlerbaum-Analyse (Fault-Tree-Analysis, FTA) unterstützt die Ursachensuche für bereits bekannte Fehlerzustände. Anders als bei der FMEA können mit FTA auch Kombinationen von Teilausfällen und deren Folgen erkannt werden. Das Ergebnis einer FTA wird als Baum dargestellt, dessen Darstellung genormt ist (Abbildung 17) [DIN25424]. Die FTA geht iterativ vor, jeder Iterationsschritt detailliert die Fehlerursachen der übergeordneten Ebene. In den meisten Fällen werden Fehler bis zur Bauteilebene heruntergebrochen.

Für die Anwendung von Fehlerbäumen in der Instandhaltung gelten dieselben Voraussetzungen wie bei der FMEA. Da Fehlerbäume auf Fehlerzuständen beruhen, können mit ihnen keine präventiven Zustandsaussagen über ein in Betrieb befindliches System gewonnen werden. Sie sind für die Zustandsermittlung eher von untergeordneter Bedeutung, haben jedoch Anwendungen in Diagnosesystemen, die bei der Fehlerursachensuche unterstützen. Barnett weist darauf hin, dass die funktionsorientierte Erstellung eines Fehlerbaumes deutlich einfacher ist als die standardkonforme komponentenorientierte Vorgehensweise [Barnett94]. Ruppert0 stellt ein EDV-System vor, das die Erstellung eines Fehlerbaums direkt aus einem CAD-System heraus ermöglicht [Ruppert02].

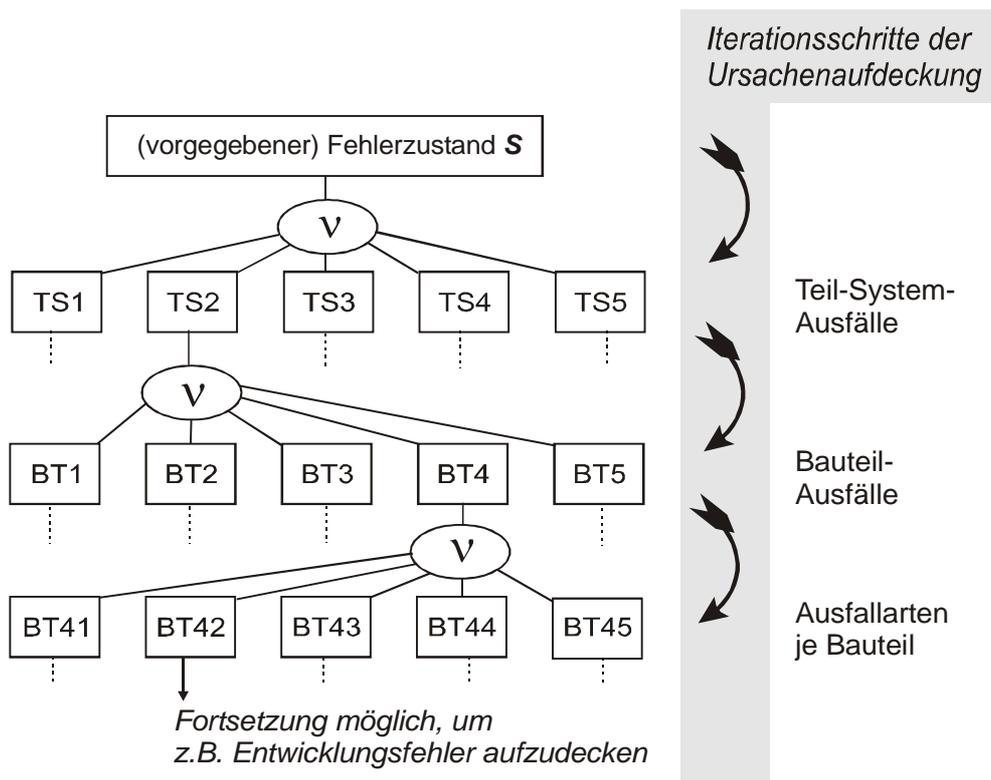


Abbildung 17 Fehlerbaum - Ergebnis einer Fehlerbaumanalyse, v bezeichnet eine der bool'schen Verknüpfungen AND oder OR

2.1.2.3 Systemtheorie nach Boole

Die bool'sche Systemtheorie ermöglicht eine analytische Ermittlung der Zuverlässigkeit zusammengesetzter Systeme, wenn die Einzelzuverlässigkeiten der Komponenten bekannt sind. Bei dieser Analyse wird das System in Elementarfunktionen zerlegt, die durch bool'sche Operatoren verknüpft werden. Es entsteht ein Schaltbild des Systems, aus dem ein geschlossener Ausdruck für die theoretische Verfügbarkeit abgeleitet werden kann [Bertsche99].

Bei der Modellierung müssen folgende Voraussetzungen berücksichtigt werden:

Zustandsdualität: Eine Elementarfunktion kann entweder betriebsbereit (Zustandswert $\xi=1$) oder ausgefallen (Zustandswert $\xi=0$) sein, eine eingeschränkte Funktionalität (Zustandswert $0 < \xi < 1$) ist nicht abbildbar.

Unabhängige Elementarfunktionen: Der Ausfall eines Teilsystems beeinflusst die Zuverlässigkeitseigenschaften anderer Teilsysteme nicht.

Nicht-Reparierbarkeit: Die Erhöhung der Zuverlässigkeit durch reparierbare Teilsysteme wird nicht berücksichtigt. In der Militärtechnik, die unter Zuverlässig-

sigkeit *mission reliability* versteht, ist diese Einschränkung bedeutungslos und entsprechend verbreitet sind bool'sche Modelle.

Wegen des einfachen Aufbaus wird eine dichte Integration des bool'schen Modells in den Konstruktionsprozess angestrebt [VDI4008-2]. Veil stellt ein EDV-System vor, das die Erstellung eines bool'schen Modells direkt aus einem CAD-System heraus ermöglicht. Dabei findet eine Unterstützung des Anwenders durch Komponentenkataloge und automatische Berechnung der Gesamtzuverlässigkeit statt [Veil99]. Die Beschränkung auf nicht-reparierbare Systeme reduziert jedoch den Nutzen eines bool'schen Modells für die Instandhaltung, da sich gerade Produktionsmaschinen durch Reparierbarkeit auszeichnen.

2.1.2.4 Markov-Modell

Die Einschränkungen bool'scher Modelle werden durch ein Markov-Modell aufgehoben [Rosemann84]. Es erfasst alle Zustände eines Systems und stellt die möglichen Zustandsübergänge und deren Übergangswahrscheinlichkeiten in einem Markov-Graph dar (Abbildung 18). Jeder Knoten des Markov-Graphen repräsentiert einen Zustand des Gesamtsystems. Für jeden Knoten kann analytisch bestimmt werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, das System in diesem Zustand anzutreffen.

Für eine Modellierung nach Markov müssen alle relevanten Zustände im voraus bekannt sein, da sie nicht durch Berechnung erschlossen werden können. Neben dieser Aufgabe, die einen ähnlichen Aufwand wie eine FMEA birgt, bereitet auch die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten Schwierigkeiten. Sollen zudem Zustände einzelner Komponenten abgebildet werden, so steigt die Anzahl der Knoten des Markov-Graph exponentiell mit der Anzahl der Komponenten. Um die Eintretenswahrscheinlichkeit für m Zustände zu bestimmen, ist ein Differentialgleichungssystem mit 2^m Gleichungen zu lösen. Infolge dieser Komplexität wird in der Praxis das Markov-Modell nur für sicherheitskritische und investitionsintensive Systeme eingesetzt, z.B. Anlagen der chemischen Verfahrenstechnik. Für die Nukleartechnik werden allerdings FMEA und FTA vorgezogen, da hier die Vermeidung von Fehlerzuständen die größte Bedeutung hat. In der Produktionstechnik hat sich bislang noch keine praxistaugliche Anwendung für Markov-Modelle gezeigt, da der Aufwand der Modellierung nicht zu rechtfertigen ist.

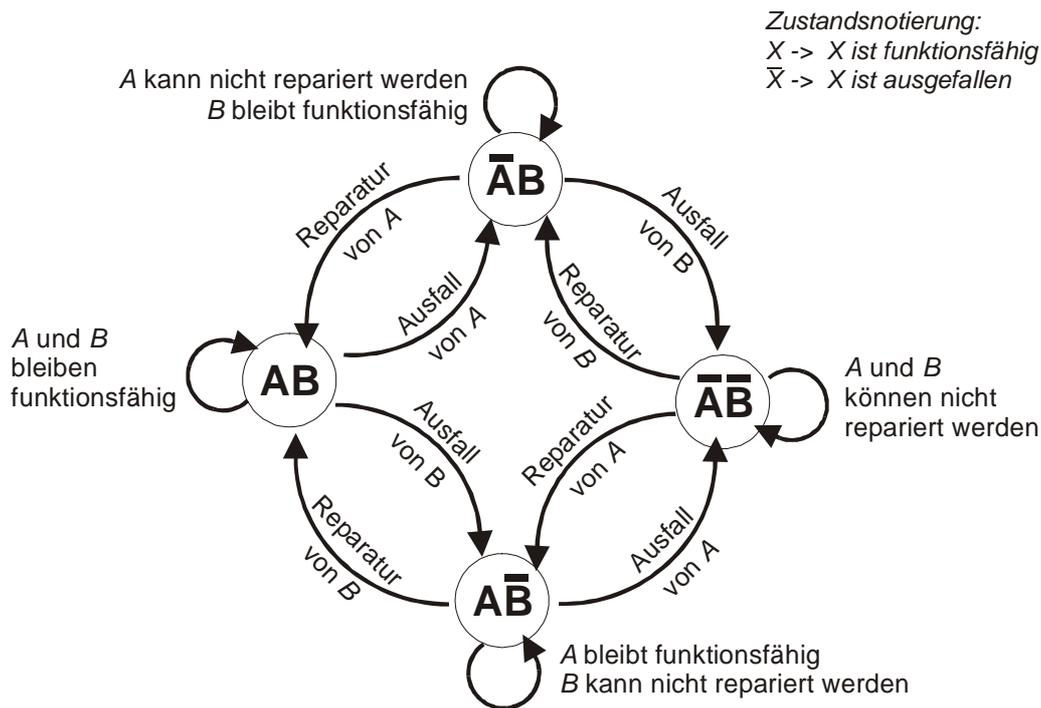


Abbildung 18 Zustandsgraph eines Markov-Modells für ein System mit 2 Komponenten $\{A,B\}$, deren mögliche Zustände funktionstüchtig oder ausgefallen sind

2.1.2.5 Zuverlässigkeit von Produktionssystemen

Produktionssysteme sind ebenfalls zusammengesetzte Systeme. Ihre Zuverlässigkeit interessiert vorrangig in der Fabrikplanung, um die Leistungen eines zukünftigen Produktionssystems zu antizipieren [Aggteleky87, Kuhn96]. Jedoch bilden Modelle für Produktionssysteme vorrangig organisatorische und logistische Aspekte ab und berücksichtigen die Instandhaltung nur am Rand [Schimmelpfeng97]. Insbesondere wird selten der Anlagenzustand abgebildet, sondern von ständiger Betriebsbereitschaft ausgegangen, oder Störungen des Produktionsablaufes werden nur statistisch behandelt [Buzacott93, Gershwin94, Kuhn98]. Diese Situation beklagen auch Instandhalter, die sich regelmäßig bei der Anlagenauswahl übergangen fühlen [Brüggemann99].

Einige wissenschaftliche Arbeiten schlagen eine Brücke zwischen den Themengebieten Fabrikplanung und Instandhaltung. Wani stellt den *Maintainability Index* vor, der Anlagenalternativen frühzeitig anhand ihrer Instandhaltbarkeit bewertet [Wani99]. Eine weitere Methode ist die Analysetechnik von Köhrmann, die durch die Abbildung von Betriebszuständen die gezielte, simulationsgestützte Suche nach verfügbarkeitssteigernden Maßnahmen ermöglicht. Dabei stützt er sich auf ein logistisches Ablaufmodell mit einer vereinfachten Zustandsaussage, die für die untersuchten Montageanlagen

ausreichend ist. Diese Methode wurde schwerpunktmäßig für die Untersuchung bestehender Anlagen konzipiert [Köhrmann00].

Um das dynamische Verhalten eines Produktionssystems zu modellieren und zu analysieren, können auch Petri-Netze [VDI 4008-5] angewandt werden. Maßberg konzipierte ein System hierarchischer Petri-Netze, das die Überwachung und Diagnose der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen ermöglicht [Maßberg91]. Schwuchow stellt eine Modellierungsmethode für Montagezellen vor, in denen das Zeitverhalten der technischen Objekte einer Montagezelle (Stationen, Roboter etc.) objektorientiert dargestellt und simuliert werden kann [Schwuchow98]. Duffie beschreibt eine Methode, die mittels Petri-Netzen die Komplexität von Informationsflüssen in Fertigungszellen bewertet. Mit Hilfe des von ihm entwickelten Komplexitätsmaßes kann er den Aufwand, der durch Erhöhung der Fehlertoleranz entsteht, bewerten [Duffie01]. Obwohl der Ansatz über Petri-Netze vielversprechend ist, bleiben wesentliche Nachteile bestehen. So müssen bereits bei der Modellierung alle Zustände erfasst werden, um die Zustandsübergänge richtig zu erfassen. Zudem lassen sich kontinuierlich Prozess (z.B. Abnutzung) nur schwer modellieren. Insgesamt ergibt sich für Petri-Netze bei der Zustandsbewertung ein schlechtes Verhältnis von (Modellierungs-) Aufwand zu erreichbarer Zustandsbewertung.

2.2 Ermittlung von Zuständen: Überwachung und Diagnose

In diesem Kapitel werden Verfahren vorgestellt, die dem Bestimmen eines Merkmalswertes (Überwachung) und der Deutung dieses Wertes (Diagnose) dienen. Die Trennung zwischen beiden Verfahrensarten wurde dabei entsprechend Definition 7 und Definition 8 vorgenommen.

Ziel von Überwachungsverfahren ist es, Fehlerzustände möglichst frühzeitig zu erkennen und so durch Warnungen oder Sofortmaßnahmen Schäden zu verhüten. Die verwendeten Methoden und Techniken können anhand der Eigenschaften des überwachten Merkmales gegliedert werden: Merkmale können *objektive*, messbare Größen sein oder als *subjektives* Merkmal von menschlichen Eindrücken abhängig sein.

2.2.1 Objektive Überwachung

Grundlage der objektiven Überwachung ist eine explizite Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen einem Fehlerzustand und einem messbaren Merkmal. Je nach der Art der Zuordnung eines Merkmals zu einem Zustand wird zwischen indirekter und direkter Überwachung unterschieden (Abbildung 19). Durch direkte Überwachung wird der Eintritt einer Ursache für einen Fehlerzustand erkannt, z.B. mit Hilfe von Abnutzungssensoren. Indirekte Überwachung hingegen erkennt die Auswirkungen eines Fehlerzustands. Häufig wird ein Nebenprodukt des Fertigungsprozesses überwacht, das einen Systemausfall ankündigt. Typischer Vertreter der indirekten Überwachung sind Medienanalyse (Öl-analyse) [Guinat96], Werkzeugüberwachung [Weck98, Pitter99] oder Körperschall [Karpuschewski01, Weber90, Beggan99]. Qualitätsregelkreise können ebenfalls als indirekte Überwachung angesehen werden. Diesen Ansatz hat Redeker verfolgt, der vom Qualitätszustand des Produkts auf den Anlagenzustand schließt [Redeker98].

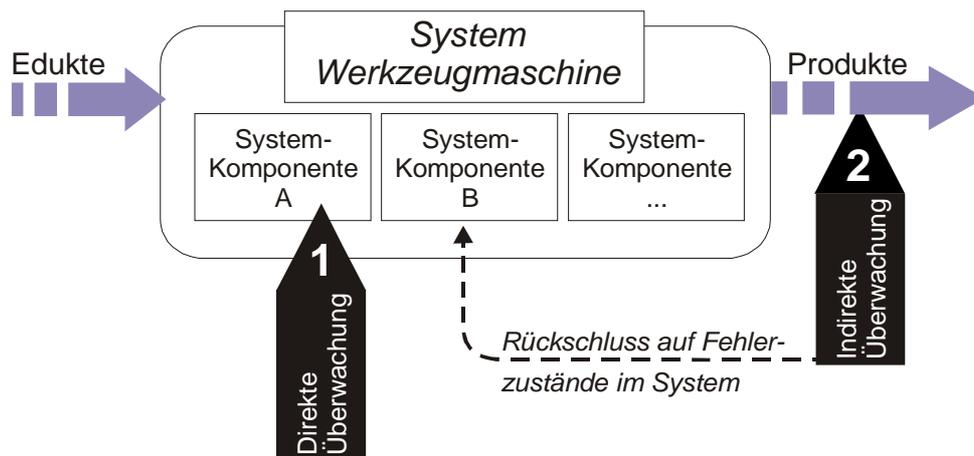


Abbildung 19 Direkter und indirekter Ansatz der objektiven Überwachung

Vielfältige Methoden der objektiven Überwachung sind für einzelne Typen von Maschinenelementen und Werkzeugen bekannt [Tönshoff97a]. Dies sind z.B. die Lastüberwachung elektrischer Antriebe [Schneider88, Isermann91, Helml92], die Überwachung von Bauteilschäden [Schneider90, Schönherr92] und die Verschleiß- und Bruchüberwachung von Werkzeugen. In der Praxis umfasst Überwachung neben der reinen Merkmalerfassung den Vergleich mit Vorgabewerten, um so vor Erreichen oder beim Überschreiten eines kritischen Zustands zu warnen. Drake stellt ein System vor, das kontinuierlich erfasste Merkmale mit Sollwerten vergleicht und bei Abweichungen alarmiert [Drake95]. Überwachungssysteme analysieren ferner die zeitliche Entwicklung eines Merkmals (Trendentwicklung). Zur dieser Art der Überwachung gehören die prognostizierenden Methoden. Unter anderem existieren Verfahren zur Schädigungs-

prognose für Kupplung-Bremse-Systeme [Regel82], Maschinengetriebe [Wirth99] und Magnetventile [Wolfram99].

Technisch ist es möglich, mit Sensorik eine komplette Zustands-Momentaufnahme des Abnutzungszustands zu erhalten. Der dazu notwendige Sensorikaufwand ist jedoch in allgemeinen wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen [Sturm96]. Einen Ausweg weisen hier die Life-Cycle-Units [Middendorf04], die aus einem standardisierten, konfigurierbaren Elektronikmodul bestehen und mit der zu überwachenden Maschinenkomponente eine Einheit bilden. Buchholz stellt LCUs für hochwertige Standardkomponenten vor (wie z.B. Stoßdämpfer) [Buchholz06]. Obwohl das Konzept der LCU sehr zukunftsweisend ist, ist die Entwicklung von passenden Algorithmen für jede Standardkomponente derzeit noch aufwändig. Weiterhin müsste noch die Frage untersucht werden, ob die Überwachung der Standardkomponenten hinreichende Zustandsinformationen liefert oder ob gerade die individuellen Bauteile eines Maschinentyps instandhaltungsrelevant sind.

Tabelle 6 zeigt eine Auswahl der in der Literatur bekannten Methoden der objektiven Überwachung. Die Auswertung von wissenschaftlichen Quellen der Jahre 1991-1996 zu Methoden und Konzepten der Instandhaltung ergab 63 Arbeiten zu Überwachungssystemen. Diese Überwachungssysteme sind im wesentlichen in sicherheitskritischen und investitionsintensiven Industrien¹² verbreitet. Im anzahlmäßigen Vergleich wurden für die Systeme der mechanischen Produktion weitaus weniger Überwachungsmethoden entwickelt, ein Mangel, der zum Teil auf die analytisch nicht ausreichend beschriebenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zurückzuführen ist.

Obwohl diese Literaturrecherche sich nicht auf die aktuellsten Quellen stützt, haben sind die grundlegende Schwierigkeiten bei der Etablierung ein objektiver Überwachungssysteme heute noch vorhanden. Kuhn zeigt dieses Handlungsfeld für die Technologieentwicklung ebenfalls auf: Es fehlen zuverlässige Algorithmen und hinreichend standardisierte Sensoren für die Zustandserfassung [Kuhn06].

¹² Insbesondere Energietechnik und -versorgung, Nukleartechnik und chemische Verfahrenstechnik.

Tabelle 6 Methoden zur objektiven Überwachung.
Insgesamt 63 Quellen zur Überwachung.

Gruppe	Typ	Anzahl
kontinuierlich überwacht	sensorisch-direkt	16
	sensorisch-indirekt	37
diskontinuierlich überwacht	stichprobenweise	6
	fristenweise	7
prognostizierend	stochastische Modelle	4
	analytische Modelle	4
	heuristische Modelle	1
	Simulationsmodelle	2

2.2.2 Subjektive Überwachung

Das fehlende explizite Wissen über Ursache-Wirkungs-Beziehungen kann zum Teil über die Erfassung von Anlagenmerkmalen durch menschliche Wahrnehmung ausgeglichen werden. Maschinenbediener erfassen aus ihrer Erfahrung heraus ganze Gruppen von Symptomen, setzen sie zueinander in Beziehung und nehmen eine Bewertung vor. Dabei werden Ursache-Wirkung-Zusammenhänge nicht explizit formuliert, sondern die Symptome über Erfahrungswissen direkt bewertet. Diese Form der Überwachung wird als *subjektiv* bezeichnet.

Die subjektive Überwachung erfährt im Rahmen von Total Productive Maintenance (TPM) eine Systematisierung. TPM bedeutet, dass die Maschinenbediener in die kontinuierliche Beobachtung der Anlage einbezogen und ihre Erkenntnisse in Anlagenverbesserungen umgesetzt werden [Biedermann00]. Damit hat TPM großen Einfluss auf die Planung und Durchführung von Instandhaltungsaufgaben, so dass eine erhebliche Steigerung der Produktivität zu erreichen ist [Hallmann98, Blanchard94]. Die subjektive Überwachung ist eine wichtige Informationsquelle, da sie Information liefert, die von Fertigungsmitarbeitern als relevant qualifiziert wurde. Zudem können Maschinenbediener auch neuartige Symptome feststellen. Diese Möglichkeit, auf bislang unbekannte Symptome zu reagieren, bietet die objektive Überwachung nicht. Gerhards betont jedoch die zur erfolgreichen Umsetzung notwendige Schulung und das Training aller Mitarbeiter [Gerhards93].

2.2.3 Diagnose

Die Aufgabe der Diagnose ist es, die Entstehung eines Fehlerzustands zu ergründen. In den meisten Fällen geschieht dies durch die Expertise des Instandhalters, der jedoch immer häufiger durch Diagnosesysteme unterstützt wird. Guckenbiel betont, dass gerade kleine und mittlere Systeme der Produktion bislang kaum durch Diagnosesysteme unterstützt werden, da ihre Entwicklung teuer ist [Guckenbiel97]. Grundsätzlich können die aus allen Bereichen der Technik bekannten Methoden in die Gruppen *strukturbasiert*, *wissensbasiert* und *analytisch redundant* geordnet werden (Abbildung 20).

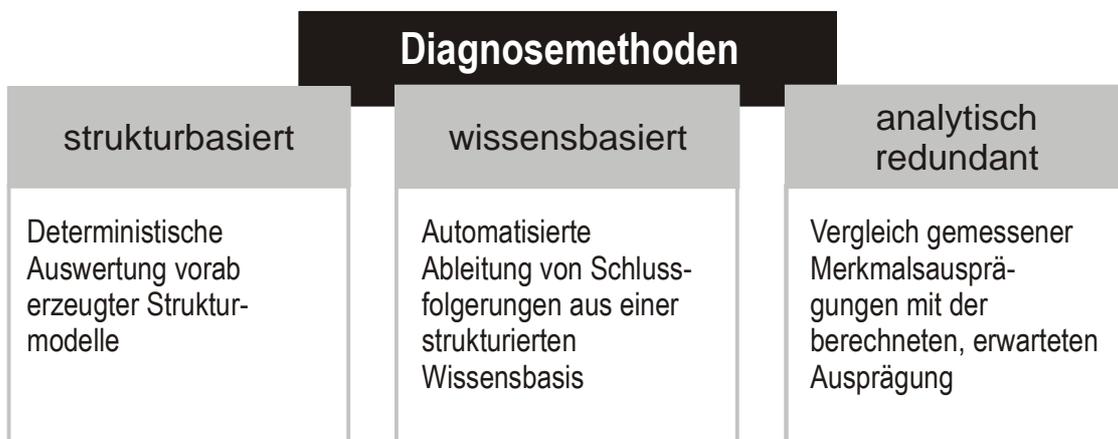


Abbildung 20 Gliederung der Diagnosemethoden

2.2.3.1 Strukturbasierte Methoden

Strukturbasierte Methoden nutzen zur Erklärung von Fehlerzuständen a priori erstellte Strukturen, die das Zusammenwirken der Komponenten eines Systems abbilden. Zusätzlich verwendet die strukturbasierte Diagnose das Konzept des *Falls*. Ein Fall ist die Beschreibung von Symptomen und ihrer Randbedingungen. In der Diagnose wird der vorliegende Fall mit Fällen aus der Vergangenheit verglichen und nach einem ähnlichen, bereits gelösten Fall gesucht. Ist ein vergleichbarer Fall vorhanden, bildet dieser das Diagnoseergebnis.

Dabei herrscht eine große Vielfalt an Realisierungen des Konzepts *Fall*. Riesbeck definiert einen Fall als eine Menge von Abläufen und in einer logischen Beziehung stehenden Ereignissen, die den Maschinenzustand und seine (vermeintliche) Entstehung beschreiben [Riesbeck89]. Weiß setzt als Attribute eines Falles lediglich die beobachteten Symptome und die erkannte Störungsursache [Weiß92]. Fälle können jedoch selten vollständig beschrieben werden, so dass beim Vergleichen häufig mehrere Alternativen plausibel sind. Wincheringer spricht von Reporten, diese können jedoch als Fälle angesehen werden. Für die Reporte führt Wincheringer ein Relevanzmaß für potentielle Diagnosen ein und erhöht so die Treffsicherheit [Wincheringer96].

Zum Aufbau der Diagnosestrukturen werden häufig Techniken aus der Zuverlässigkeitstechnik eingesetzt, z.B. FMEA, Fehlerbaumanalyse oder Ereignis-Ablauf-Analyse. Zöllner präsentiert eine Methode auf Basis der FMEA, die eine Menge der diagnoserelevanten Fehler ableitet und nur diese in einem Diagnosesystem umsetzt [Zöllner95]. Wincheringers Fallbegriff ist originär der Fehlerbaumanalyse zuzurechnen. Ein durchgehendes Diagnosesystem auf Basis bool'scher Modelle stellt Lopez-Cortez für die Schiffstechnik vor [LopezCortez96].

2.2.3.2 Wissensbasierte Methoden

Menschliches, heuristisch und subjektiv charakterisierbares Fachwissen ist *der* Erfolgsfaktor der Diagnose. Dieses Wissen wird durch wissensbasierte Methoden operationalisiert und in wissensbasierten Systemen bzw. Expertensystemen gespeichert [Löschner93]. Die Qualität eines wissensbasierten Systems hängt wesentlich von Güte und Umfang des repräsentierten Domänenwissens ab [Lehmann89]. Die verschiedenen Formen der wissensbasierten Systeme und ihre Konstruktionsprinzipien erläutert [Mazikowski01].

Aufgrund des Aufwands ihrer Erstellung sind wissensbasierte Systeme eher in investitionsintensiven Industrien verbreitet. Bath stellt eine Methode zur Prozessanalyse bei verfahrenstechnischen Anlagen vor [Bath95]. Binder konzipiert ein Gesamtsystem für kraftwerkstechnische Anlagen, Renfrey und Au-Yang bauen Wissensbasen für die Diagnose von motorbetätigten Ventilen auf [Binder96, Renfrey95, Au-Yang96]. Seibold entwickelte ein System für die Diagnose von Färbemaschinen, das starke Elemente eines strukturbasierten Systems auf Grundlage einer FMEA aufweist [Seibold94]. In der Produktionstechnik entwickelte Torvinen ein Diagnosesystem, das auf Basis eines Expertensystems Verfügbarkeitsanalysen von FMS¹³ ermöglicht [Torvinen96]. Ein speziell für Koordinatenmessgeräte ausgelegtes Expertensystem stellt Steger vor: Dieses System ermöglicht es, automatisch behebbare Störungen von Messprozessen zu erkennen und innerhalb vorhandener Programmier- und Steuersysteme zu behandeln [Steger94].

Bei wissens- und strukturbasierten Diagnosesystemen stellt sich das Paradox ein, dass der zu diagnostizierende Fehlerzustand dem System bekannt sein muss, um den Bediener beraten zu können. Anwender erwarten jedoch bei unbekanntem Fehler Hilfe durch ein Rechnersystem. Hinzu kommt, dass algorithmische Systeme nur auf solche Eingaben reagieren können, die sie interpretieren können. Hierzu schlägt Ebner den durchgehenden Einsatz von Wörterbüchern vor, die eine eindeutige Spezifikation von Daten ermöglichen [Ebner96]. Aber auch für diese Thesauri gilt, dass sie vorab für alle

¹³ FMS – Flexible Manufacturing System

möglichen Fehlerzustände präpariert werden müssen. Solche im vorab möglichen Fehlerzustände werden jedoch bereits in der Konstruktion oder durch präventive Maßnahmen wie Poka-Yoke eliminiert. Für Thesauri bleibt damit das relativ kleine Anwendungsfeld der zufälligen Standardfehler, deren Behandlung durch präventive Maßnahmen zu teuer wäre¹⁴.

2.2.3.3 Methode der analytischen Redundanz

Das Prinzip der analytischen Redundanz¹⁵ basiert auf dem Vergleich von objektiv gemessenen Merkmalen eines Realsystems mit den simultan berechneten Merkmalen einer Maschinensimulation. Weichen die berechneten Werte der Beobachtungsgrößen von den im realen System gemessenen Werten ab, so wird auf eine Fehlfunktion des realen Systems geschlossen (Abbildung 21). Das Simulationsmodell ist analytisch aufgebaut und formuliert Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge explizit. Mit Hilfe der analytischen Redundanz können auch bislang unbekannte Fehlerzustände erkannt und gedeutet werden, solange diese Fehlerzustände die Änderung eines Beobachtungsparameters erwirken.

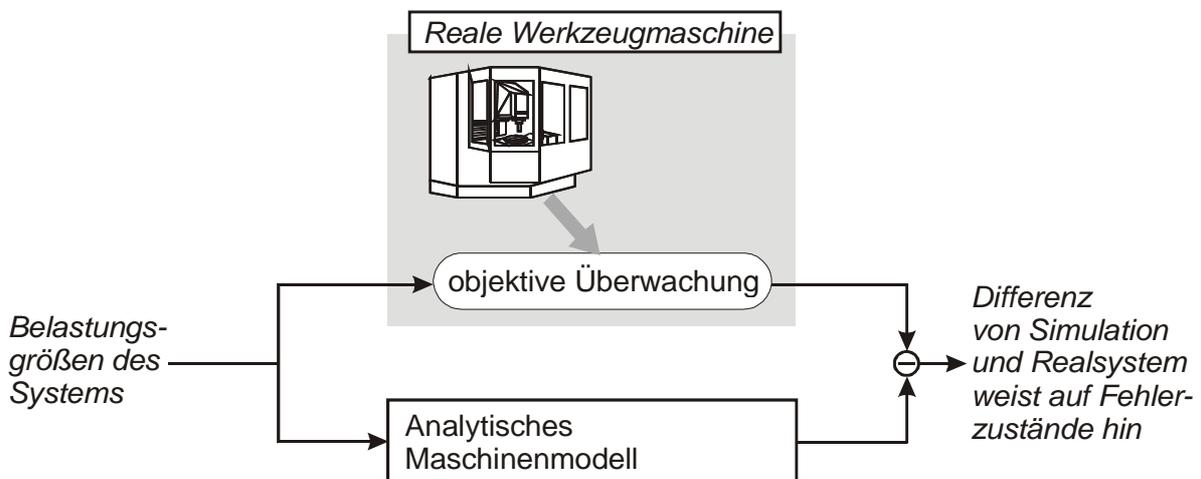


Abbildung 21 Prinzip der Diagnose mit analytischer Redundanz

Voraussetzung für die modellbasierte Diagnose ist die Existenz eines hinreichend robusten und verifizierten Modells der zu diagnostizierenden Anlage. Für die dynamischen Systeme der Produktionstechnik ist das typische Modell ein parametrisiertes Differentialgleichungssystem. Dieses DGLS gibt das zeitliche Verhalten der mechanischen Kom-

¹⁴ Wobei der Aufbau eines Thesaurus wiederum als präventive Maßnahme gelten kann.

¹⁵ Auch *modellbasierte Diagnose* genannt.

ponenten wieder [Isermann94, Billings84, Tomizuka85]. Ein speziell für die Belange der Verfügbarkeitssicherung abgestimmtes Modell einer Umformanlage stellen Roskam und Rudolph vor [Roskam99, Rudolph99]. An der TU München wird an der Erweiterung des Anwendungsbereichs der analytischen Maschinenmodelle gearbeitet und die Simulation einer NC-Steuerung entwickelt, die NC-Code abarbeitet und ein Werkzeugmaschinenmodell steuert [virtWZM01]. Neuere Arbeiten ergänzen diesen Ansatz und zeigen, wie die aufwändige Modellierung von Werkzeugmaschinen rationalisiert werden kann [Xu03].

Insgesamt ist die modellbasierte Diagnose für das in dieser Arbeit verfolgte Ziel noch nicht ausgereift genug. Jedoch könnte die modellbasierte Diagnose in der Theorie zukünftig eine Fähigkeitsuntersuchung¹⁶ ersetzen.

2.3 Bewertung von Zuständen: Instandhaltungsmanagement

Das Instandhaltungsmanagement hat die Aufgabe, Instandhaltungsbedarf zu erkennen und die Maßnahmendurchführung zu steuern. Diese Arbeit wird häufig von einer Instandhaltungsstrategie geleitet und durch ein rechnergestütztes Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem (IPS) unterstützt. Sowohl Instandhaltungsstrategie als auch IPS sind als Werkzeuge der Instandhaltung aufzufassen, die jedoch sorgsam aufeinander abgestimmt sein müssen.

2.3.1 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien sind langfristige Leitlinien für die Instandhaltung. Sie geben vor, wie und wann die Instandhaltungsplanung auf Ereignisse reagieren muss, um den gewünschten Maschinenzustand zu erhalten. Die drei grundlegenden Instandhaltungsstrategien lassen sich anhand der Lage der Eingriffsgrenze im Bezug zum Abnutzungsvorrat unterscheiden [vgl. auch Bandow05]:

- *Korrektive Instandhaltung:*
Es wird erst nach Ausfall eines Systems reagiert, der Abnutzungsvorrat wird dabei vollständig ausgeschöpft.
- *Präventive Instandhaltung*
Nach Ablauf eines vordefinierten, konstanten Nutzungsparameters (z.B. Zeitspanne, gefertigte Stückzahl) wird ohne Berücksichtigung des noch vorhandenen

¹⁶ vgl. Kap. 2.1.1.2

Rest-Abnutzungsvorrats eine Maßnahme zur Wiederherstellung des Abnutzungsvorrats durchgeführt.

- *Zustandsorientierte Instandhaltung*

Maßnahmen werden dann durchgeführt, wenn der verfügbare Abnutzungsvorrat möglichst gut ausgeschöpft ist, ohne dabei eine Störung zu riskieren.

Die richtige Wahl der Instandhaltungsstrategie bestimmt die ökonomische Effizienz der Instandhaltungsarbeiten. In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass die größten Chancen zur Erreichung eines Effizienzmaximums in der zustandsorientierten Instandhaltung liegen. Ihre Vorteile wurden von vielen Unternehmen erkannt [Kaschube97, Klemme-Wolf98, Lee99, Kuhn06]. Warnecke weist zusätzlich darauf hin, dass eine vorteilhafte Instandhaltungsstrategie sowohl auf einer laufenden Verfolgung des Anlagenzustands beruht als auch das Entwurfskonzept des Produktionssystems, das Produktionskonzept, berücksichtigen sollte [Warnecke92].

Zur Auswahl einer Instandhaltungsstrategie ist die Methode Reliability Centered Maintenance (RCM) weit verbreitet [Moubray97]. Sie geht von einer FMECA¹⁷ des Produktionssystems aus, um danach sequenziell den Einsatz der Strategien korrektive Instandhaltung und Zustandsorientierung sowie die Option TPM¹⁸ für jedes Instandhaltungsobjekt zu bewerten [Pujadas96]. Entsprechend des Ausfallrisikos, dem ein Instandhaltungsobjekt unterliegt, wird eine Empfehlung ausgesprochen. Objekten mit geringem Ausfallrisiko wird eine aufwandsarme Strategie zugeordnet, z.B. korrektive Instandhaltung. Eisinger und Rakowsky erweiterten diesen Entscheidungsmechanismus um den „Degree of Belief“. Statt einer eindeutigen Empfehlung wird für jede mögliche Instandhaltungsstrategie eine Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der die Wahl dieser Strategie falsch wäre [Eisinger01]. Diese Erweiterung ermöglicht transparente Entscheidungen, da reines RCM in Grenzfällen risikominimierend vorgeht und aufwändige Instandhaltungsstrategien empfiehlt. RCM weist Analogien zu der von Veil und Bertsche vorgestellten Vorgehensweise zur Bestimmung von Systemzuverlässigkeiten auf [Veil99, Bertsche04]. Die von Veil durchgeführte ABC-Analyse der zuverlässigkeitsrelevanten Teile entspricht der Bewertung des Ausfallrisikos im RCM-Vorgehen. Dabei ist der von Veil bestimmte konstruktive Reifegrad ein Maß, das in einem RCM-Prozess zur Auswahl einer Instandhaltungsstrategie verwendet werden kann.

In der Praxis wird bei der Wahl einer Instandhaltungsstrategie häufig auf Wiederherstellung und Erhaltung des Ursprungszustands fokussiert [Adam89, Hutchinson97, Lülf99].

¹⁷ Failure Mode, Effect and Criticality Analysis, siehe auch Kap. 2.1.2.1.

¹⁸ Total Productive Maintenance, siehe auch Kap.2.2.2 .

Untersuchungen von Gülker ergaben jedoch, dass mit gezielten Umbauten und Upgrades Verfügbarkeit, Produktqualität und Kosten verbessert werden [Gülker99]. Ebenso belegt Perlewitz, dass die Anlageneffektivität durch systematische Verbesserung der Technik erhöht werden kann [Perlewitz99]. Trotz dieser durchaus positiven Ergebnisse wird die systematische Leistungssteigerung von Anlagen bei der Wahl einer Instandhaltungsstrategie bislang nicht berücksichtigt. Leistungssteigernde Maßnahmen werden situativ als Einzelfälle betrachtet und die Möglichkeiten eines systematischen Zustandscontrollings nicht ausgeschöpft [Schrüfer99].

2.3.2 Instandhaltungsanalyse

Der Tätigkeitszyklus der Instandhaltung (vgl. Abbildung 1) wird durch eine regelmäßige Soll-Ist-Analyse des Anlagenzustands getrieben. Diese Untersuchung wird als Instandhaltungsanalyse bezeichnet und in Abweichungs- und Schwachstellenanalyse unterteilt (Abbildung 22). Die Abweichungsanalyse ist ein Hilfsmittel des Instandhaltungsmanagements zur strategischen Verbesserung von Planung und Steuerung der Instandhaltung einschließlich der Arbeitsplanung [Biedermann85]. In einer Abweichungsanalyse werden u.a. abgeschlossene Instandhaltungsaufträge in Zeit und Kosten nachkalkuliert, Kennzahlen ermittelt und organisatorische Verbesserungspotentiale aufgedeckt.

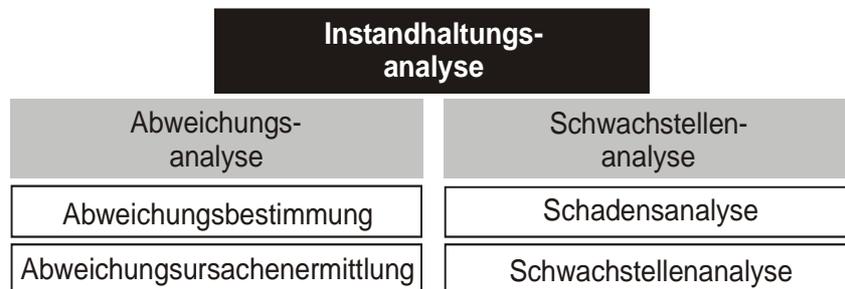


Abbildung 22 Funktion der Instandhaltungsanalyse nach [Hackstein87]

Ziel der Schwachstellenanalyse ist, die Störungshäufigkeit der Instandhaltungsobjekte zu verringern. Datengrundlage einer Schwachstellenanalyse sind Historiedaten. Anhand der aufgetretenen Störungen werden Schwachstellen lokalisiert und Lösungsmöglichkeiten ermittelt [Storr98]. Lösungen werden in allen Bereichen gesucht, z.B. durch Taktzeitoptimierungen, Reduzierung technischer Schwachstellen oder durch Qualifizierungsmaßnahmen [Wiendahl98]. Auch Schwachstellenanalysen werden in der Praxis meist situativ durchgeführt [Wiendahl99], obwohl sie ein wesentlicher Teil eines systematischen Zustandscontrollings sind.

2.3.3 Instandhaltungsplanung

Die Umsetzung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen obliegt der Instandhaltungsplanung, die ein Gleichgewicht zwischen der Abarbeitung anstehender Maßnahmen und Bereitstellung ausreichender Arbeitskapazität und -qualifikation zur (ungeplanten) Störungsbehebung finden muss. Die Instandhaltungsplanung umfasst damit die kurz- und mittelfristige Planung von Ressourcen und Terminen (Abbildung 23).

Die grundlegenden Verfahren zur Wahrung des Gleichgewichts zwischen geplanten und ungeplanten Tätigkeiten wurden von Hackstein und Männel beschrieben [Hackstein87, Männel68]. In der Produktionstechnik wird davon ausgegangen, dass mit dem Ziel der minimalen Stillstandsdauer ein begrenzter Anteil von Störungen akzeptiert werden kann. Viele Forschungsaktivitäten gehen unter dieser Prämisse von der Annahme aus, dass es wirtschaftlich vorteilhaft ist, Maßnahmen innerhalb eines Zeitraumes zusammenzuziehen, in denen eine Anlage ohnehin still steht („Blockbildung“). Männel, Schosee und Wolf beschreiben Verfahren, die eine entsprechende Terminkoordination ermöglichen [Männel68, Schosee84, Wolf70]. Haase beschreibt ein Blockbildungsverfahren, bei dem eine zu optimierende Zielgröße wie Verfügbarkeit oder Kosten frei gewählt werden kann [Haase87]. Tönshoff entwickelte den Instandhaltungsassistenten, der eine reaktionsschnelle Blockbildung simultan zur aktuellen Störungsbehebung ermöglicht [Tönshoff98, Seufzer01].

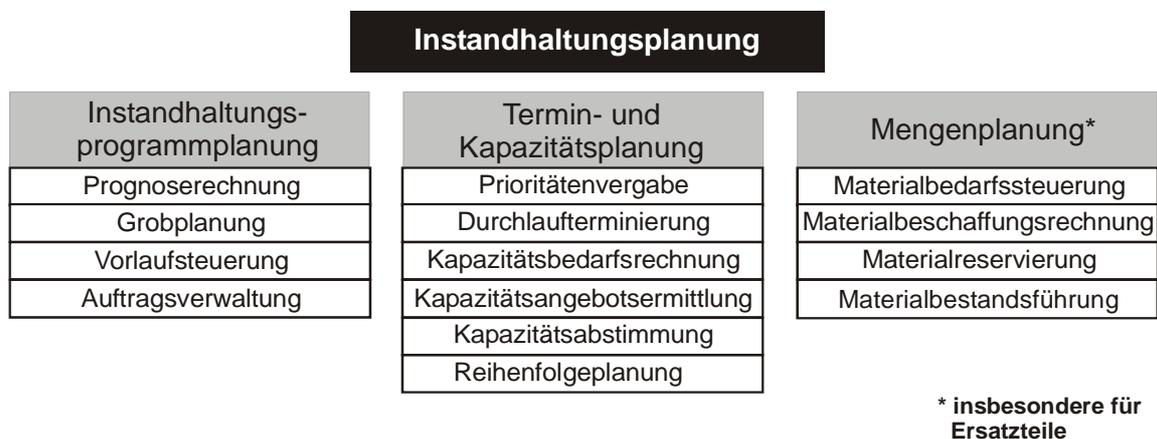


Abbildung 23 Aufgaben der Instandhaltungsplanung nach [Hackstein87]

2.3.4 Integrierte Instandhaltungsplanung und -analyse

Die Ausführung von Instandhaltungsplanung und -analyse wird in der Praxis häufig durch integrierte EDV-Systeme unterstützt.

Werner beschreibt das System MARIS II zur Arbeitsvorbereitung in der Instandhaltung, das die Planung mit Standardarbeitsplänen unterstützt [Werner90]. In [Baumann96,

Bihr90, Hammer91, Rast91] werden Systeme zur Planung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sowie zur langfristigen Personalplanung erläutert. Alle Systeme unterstützen vorrangig die Planung präventiver Instandhaltungsmaßnahmen und können auf situative Anforderungen wie Störungen nicht angemessen reagieren.

Intensiv befassen sich Forschungsarbeiten mit der Aufgabe, aus der Erfassung und Auswertung von Prozesssignalen zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen präventiv abzuleiten. Das von Iglesias entwickelte System PM-MAINT ermittelt die Betriebsstundenzahl für Instandhaltungsobjekte und schlägt einen Instandhaltungszeitpunkt vor. Dieser Zeitpunkt dient dem Instandhaltungspersonal als Orientierungshilfe für die Planung von Maßnahmen [Iglesias97]. In [Haase91] wird ein System zur zustandsabhängigen Instandhaltungsplanung vorgestellt, das auf Basis von Ergebnissen der Zustandserfassung das voraussichtliche Ausfallverhalten von Elementen bzw. Baugruppen von Fabrikanlagen ableitet.

In [Schulz-Kratzenberg92] werden die Systeme UNIDATA und INSTPLAN vorgestellt. Während UNIDATA zur universellen Datenerfassung und -aufbereitung genutzt wird, unterstützt INSTPLAN die Planung der Instandhaltung für automatische Montageanlagen. Im Rahmen von INSTPLAN werden den Elementen einer Anlage jeweils potenzielle Störungsarten und Instandhaltungsmaßnahmen zugeordnet. Auf Basis prognostizierter Anlagenstillstände werden voraussichtliche Instandsetzungsaktivitäten und der erforderliche Personalbedarf bestimmt. Dabei tritt unweigerlich das Dilemma ein, dass auf ein Ereignis reagiert werden muss, das nicht als potentiell Ereignis erkannt und entsprechend vorbereitet wurde.

Viele Systeme setzen für die Schwachstellenanalyse auf einen direkten Zugang zu Felddaten. Eine wichtige Datenquelle bilden speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS). Die Kopplung von SPS mit einem Auswertesystem wird häufig bei prozesstechnischen Anlagen zur Prozessvisualisierung eingesetzt [Hilger94, Gaul94]. Laur beschreibt ein Prozessvisualisierungssystem, bei dem die erfassten Daten über die Visualisierung hinaus für weiterführende Auswertungen genutzt werden [Laur93]. In [Tönshoff97b] wird ein technischer Leitstand für Buchbindesysteme vorgestellt. Dieser Leitstand hat ergänzend zu einem offline Monitoring-Modul ein Wartungsmodul, das die Durchführung der termingerechten Wartung unterstützt. In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass heute die meisten rechnergestützten Systeme nur die Schritte Überwachung (fault detection) und Diagnose (fault isolation) realisieren. Aber gerade Bewertung (fault identification) ist notwendig, um langfristig Instandhaltungsmaßnahmen auszuwählen, zu planen und durchzuführen [Gertler98].

Kommerziell werden zahlreiche Systeme zur Unterstützung der Instandhaltung angeboten. Kuhn [Kunh06] zeigt jedoch deutliche Defizite auf: IPS-Systeme sollen sich an der

Ziel-Verfügbarkeit des betreuten Produktionssystem orientieren und die Planung von Instandhaltungsaufträgen entsprechend steuern. Die dazu notwendigen instandhaltungsgerechten Kennzahlen (z.B. MTBF, λ) sollten zu diesem Zweck automatisch berechnet werden. Kuhn weist insbesondere darauf hin, dass bislang die richtige Ebene der Datenaggregation für diese Auswertung nicht systematisch ausgewählt wird. Auf die mangelnde Funktionalität der bestehenden Systeme zur Unterstützung bereichs- und unternehmensübergreifender Instandhaltungsprozess weist auch Gudszend hin [Gudszend03b].

2.3.5 Integrierte Produktmodelle

Als systemtechnische Grundlage für die IPS-Systeme dienen heute fast ausschließlich eigenständige Datenbanken. Als Entwurfsansatz für Datenbanken, die technische Systeme abbilden, dienen dabei sogenannte Produktmodelle. Diese Modelle wurden zuerst im Bereich der rechnerunterstützten Konstruktion eingesetzt und werden heute bei Geometrieabbildung, Datenübergabe und Archivierung angewandt [Grabowski93, Pätzold91, Geiger94]. Die laufende Forschung erschließt jedoch kontinuierlich neue Anwendungsgebiete wie Rückmeldewesen der Produktion, Vertrieb, Instandhaltung und Recycling [Anderl89]. Auch Planungsvorgänge können als Teil des Produktmodells gelten, wie Awiszus darlegte (Definition 10). Ziel der heute noch nicht abgeschlossenen Forschung über Produktmodelle ist die einheitliche Festlegung und formale Spezifikation eines Informationsmodells, das alle im Lebenszyklus eines Produktes anfallenden Merkmale abbildet.

Ein wesentliches Problem bei der Entwicklung des integrierten Produktmodells ist, dass unterschiedliche Anwendungszwecke verschiedene Gliederungsstrukturen erfordern. Shah führte hier das Konzept *technisches Element*¹⁹ (engl. feature) ein. Dieses einheitliche Basiselement bildet einen Container für Informationen aus Konstruktion, Fertigung und Montage [Shah88].

In dieser Arbeit wird der Begriff des Produktmodells nach Awiszus angewendet (Definition 10). Er schließt die Beschreibung der Fertigungsprozesse ausdrücklich in die Dokumentation eines Produktes ein.

¹⁹ Eine umfassende Definition des Begriffs gab [Tönshoff93]: „Technische Elemente sind Objekte, die zur Beschreibung von Werkstücken, Baugruppen oder Produkten unter den Gesichtspunkten Konstruktion, Arbeitsplanung, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung dienen. Den technischen Elementen können geometrische, technologische und funktionale Eigenschaften zugewiesen werden.“

Definition 10 Produktmodelle

sind Dokumentationen sämtlicher relevanten internen und externen Vorgänge, Informationen und Ergebnisse, die für einen Auftrag von der Angebotserstellung über die Produktentwicklung und Fertigung bis zum Ablauf der Produktverantwortung anfallen. [Awiszus99]

Die Verbindung von Geometrie mit anwendungsspezifischem Wissen durch technische Elemente eröffnete neue Anwendungsbereiche für das integrierte Produktmodell. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die von Schunke entwickelte Methode zur Kombination von konstruktionstechnischen Elementen (design features) mit fertigungstechnischen Elementen (manufacturing features) zu nennen [Schunke90]. Krause beschreibt das graphisch-interaktive System FEAMOS zur Integration von konstruktions- und fertigungstechnischen Elementen mit Qualitätsfeatures mit dem Ziel der Unterstützung von Fehlermöglichkeits- und –einflußanalyse und Fehlerbaum-Analyse [Krause96]. Da technische Elemente jedoch Substrukturen einzelner Bauteile abbilden, sind sie für die Instandhaltung deutlich zu detailliert. Eine entsprechende Ausarbeitung, welche Inhalte eines Technischen Elements für die Instandhaltung umfasst und angibt, welche Bildungsregeln anzuwenden sind, ist bislang nicht erfolgt.

Im Rahmen der Instandhaltung ist die Nutzung von Produktmodellen heute noch wenig verbreitet, ihre durchgehende Nutzung zeichnet sich jedoch bereits ab. So sehen die Hersteller von Werkzeugmaschinen im Bereich des Konfigurations- und Service-Managements den Bedarf für ein systematisches Product Lifecycle Management [SFB384-99]. Einen Ansatz hierzu stellt Niestadtkötter vor, mit dessen Methode verfügbare Lifecycle-Daten in ein Produktmodell eingesteuert und ausgewertet werden können [Niestadtkötter01]. Takata entwickelte ein „Maintenance Data Management“ zur Rückverfolgung und Auswertung von Fehlfunktionen. Diese werden in einem lebenszyklusorientierten Produktmodell erfasst und ausgewertet. Das System bietet dabei eine Komponente zur Ursachenfindung an [Takata99]. Nowak beschreibt ein Integrationsmodell, mit dessen Hilfe die in Service und Instandhaltung gewonnenen Erkenntnisse in andere Fachbereiche eines Unternehmens zurückfließen können [Nowak01].

Damit Produktmodelle in der Instandhaltung anwendbar werden, ist die Abbildung der funktionalen Gesamtstruktur eines technischen Systems notwendig. Kaiser stellt eine Methode vor, bei der die komplexe Struktur einer Werkzeugmaschine aus einer Menge parametrisierter Modellbausteine in einem Entwurfssystem gebildet wird. Dieses Entwurfssystem kennt die Abhängigkeiten zwischen Parametern verschiedener Komponenten und bildet deren Zusammenspiel ab [Kaiser95]. Tomaszunas stellt ebenfalls ein komponentenbasiertes Maschinenmodell vor, bei dem die Bausteine zu einem Maschinen-Simulationsmodell zusammengefügt werden [Tomaszunas98]. Beide Ansätze sind

für die Anwendung in der Maschinenentwicklung konzipiert. Schaich zeigt einen Weg, wie ein komponentenbasiertes Maschinenmodell konsequent in den verschiedenen Fachbereichen eines Unternehmens angewandt werden kann, bleibt aber auf die Entwicklungsphase fokussiert [Schaich01]

Im Rahmen der STEP-Initiative wird eine Normierung des dokumentatorischen Produktmodells betrieben [Benn98]. Die Normenreihe [ISO 13030] „STEP“ und die von ihr abgeleiteten Werkzeuge sichern dabei die Integrität der Daten [Röhrich98]. Für die Anwendung in der Instandhaltung erscheint das Anwendungsprotokoll AP208 *Life-Cycle Product Change Process* geeignet. Eine eingehende Betrachtung zeigt jedoch, dass es vorrangig für das Änderungsmanagement konzipiert wurde. Die spezifischen Anforderungen der Instandhaltung sind in den vorrangig geometrieorientierten Entwicklungen nicht vollständig abgedeckt. Auch die darüber hinaus bestehende Vielzahl gesetzlicher Regelwerke, Auflagen und Umweltbestimmungen, welche die Instandhaltung von Fertigungsanlagen beeinflussen, berücksichtigen die genannten Modellierungen nicht.

2.4 Forschungstrends

In der wissenschaftlichen Diskussion hat sich die Perspektive ergeben, durch die analytische Bestimmung des Verhaltens einer Produktionsanlage eine Zustandsuntersuchung zu unterstützen. Im Rahmen der Entwicklung einer sogenannten *virtuellen Werkzeugmaschine* wird angestrebt, ein durchgehendes Modell des Verhaltens einer Werkzeugmaschine zu erstellen [Runde04]. Infolge der unzureichenden Skalierbarkeit der einzelnen Modelle ist diese Aufgabe bislang ohne durchgehende Lösung [virtWZM01]. Beispielsweise eignet sich ein FEM-Modell²⁰ einer Produktionsanlage zur rechnerischen Analyse der Maschinensteifigkeit. Doch obwohl die rechnerische Modalanalyse ebenfalls auf einem FEM-Modell basiert, ist ein neues Modell notwendig. Denn die heutige technische Berechnungskapazität erfordert ein weniger detailliertes Modell. Bislang konzentrieren sich die Aktivitäten rund um die virtuelle Werkzeugmaschine auf die Unterstützung der Maschinenentwicklung.

Eine zukünftige Einsatzmöglichkeit der virtuellen Werkzeugmaschine für die Instandhaltung ist die Diagnose mit analytischer Redundanz und insbesondere die Toleranzanalyse. Wesentlich für den Gesamtzustand ist nicht der Zustand einzelner Komponenten, sondern deren Zusammenspiel. VanHouten illustrierte diese Tatsache anhand des Beispiels „elektrisches Küchenmesser“. Dieses Produkt wird von einem Hersteller mit ge-

²⁰ FEM – Finite Elemente Methode

ringen Toleranzen gefertigt und erfüllt die Kundenansprüche an Handhabung und Einsatz. Von diesem Produkt fertigt ein zweiter Hersteller ein Plagiat. Dieses Plagiat ist kostengünstiger und mit weniger eng tolerierten Einzelteilen hergestellt. Insgesamt erfüllt es die Funktion „schneiden“ jedoch besser, da die weniger passgenauen Teile mehr kurze Impulse erzeugen, die das Schneidverhalten verbessern [vHouten01]. Ein Rahmenkonzept für die Toleranzanalyse wurde ebenfalls von van Houten vorgestellt [vHouten00]. Gerade die Toleranzanalyse in Zusammenspiel mit Verschleißmodellen könnte sich für die Instandhaltung als nützlich erweisen. Jedoch muss das exakte Verhalten vieler Maschinenelemente noch erforscht und dokumentiert werden. Forschungsarbeiten zu einzelnen Komponenten beschreiben [Ayandokun97, Tönshoff97a] und [Ahlers00].

Von Aurich et. al wird in einer Reihe von Veröffentlichungen die projektorientierte Herangehensweise an das Management eines Produktionssystems vorgestellt [Aurich04a]. Ein solches Produktionsprojekt umfasst dabei alle Phasen ab der Planung bis zum Rückbau eines gesamten Produktionssystems. Dieser Ansatz ermöglicht es, innerhalb der Projektorganisation ein systematisches Änderungsmanagement zu installieren, das alle Änderungen am einem Produktionssystem begleitet [Aurich04b]. Parallel dazu beschreibt Aurich auch das Projekt „OptiPro“, das über eine gezielte MDE/BDE-Erfassung die Steuerung von Instandhaltungsprozessen auch über Qualitätsdaten erlaubt [Aurich03, Aurich06] (vgl. auch [Niemeier01]). Obwohl diese Einzelarbeiten ein zusammenhängendes Bild ergeben, wurde bislang von Aurich et.al. kein methodisch-theoretisches Gesamtkonzept vorgelegt.

2.5 Kritische Würdigung

Der Stand des Wissens zeigt die Vielgestaltigkeit des Begriffs *Zustand* für das Gesamtsystem Produktionsanlage. Je nach Zielsetzung können andere Zustandsaspekte unterschieden werden. Um verschiedene Aspekte simultan darzustellen, muss ein Zustandsraum definiert werden.

Wesentlich wird der Zustandsbegriff jedoch durch den Betrachtungsumfang geprägt. Für Gesamtsysteme werden andere Messgrößen und Modelle als für Komponenten gewählt. Ein Komponentenzustand wird zum Beispiel mit dem Konzept des Abnutzungsvorrats eines Merkmales beschrieben. Da eine Produktionsanlage jedoch mehrere Merkmale umfasst, wird ihr Zustand durch Maßzahlen wie Nettoproduktivzeit oder Maschinenfähigkeit ausgedrückt.

Ein Ansatz, die Trennung von Komponente und Gesamtsystem aufzuheben, ist der Einsatz von Maschinenmodellen. Ziel dieser Modelle ist die Entwicklung einer Rechenvor-

schrift, die aus den Komponentendaten die Eigenschaften der Gesamtmaschine bestimmt. Diese Modelle wurden jedoch nicht gezielt für das Anwendungsgebiet Instandhaltung entwickelt, sondern entstammen mehrheitlich dem Fachgebiet Maschinenentwicklung. Auch für Überwachung und Diagnose ist ein Zusammenhang mit den Modellen der Zuverlässigkeitsanalyse festzustellen. Viele Diagnosesysteme bauen z.B. auf einer FMEA auf. Zudem ist eine Analogie eines (Diagnose-) Falls mit einem Fehlerbaum unverkennbar: Während ein Fall einen real eingetretenen (wenn auch unerwünschten) Fehlerzustand repräsentiert, ist ein Fehlerbaum die gedankliche Vorwegnahme eines Falls²¹.

Ob eines oder mehrere der in den vorangehenden Kapiteln skizzierten Modelle zur Darstellung von Zuständen und damit zur kontinuierlichen Zustandsbewertung geeignet ist, wird anhand von fünf Kriterien bewertet (Tabelle 7). Diese Kriterien sind aus den in Kapitel 1.4 vorgestellten Prinzipien einer Zustandsverfolgung abgeleitet.

Tabelle 7 Übersicht: Eignung der Zustandsmodelle zur Zustandsbewertung

	Abnutzungsvorrat	Maschinenfähigkeit	Zuverlässigkeit	Effektivitätsbeurteilung	FMEA	Fehlerbaum	Bool'sche Theorie	Markov-Theorie	Petri-Netze
Sollgrößen dokumentiert	j	j*	j*	j*	n	n	j*	n	n
Istgrößen dokumentiert	j	j	j	j	n	n	j	j	n
Unterstützt Soll-Ist-Vergleich	j	j	j	j	n	n	j	n	n
Funktionen als Modellelement	n	-	j	n	j	j	j	j	j
Nutzungsbegleitender Einsatz möglich	j	n	j	j	j	j	n	n	j
Maßnahme ableitbar	j	n	n	n	j	j	j	j	n

j* - Nur verfügbar nach manueller Eingabe

²¹ Für die Entwicklung entsprechender Systeme zur Zuverlässigkeitsanalyse und Maschinendiagnose ist zu prüfen, ob eine Integration erfolgen kann. Diese Aufgabe ist aber nicht Teil dieser Arbeit.

Zunächst muss ein Modell eine Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Größen ermöglichen, d.h. es muss sowohl Soll- als auch Ist-Größen abbilden oder berechnen können. Nur wenn Soll und Ist abgebildet werden, kann auch ein Soll-Ist-Vergleich erfolgen. FMEA, die Fehlerbaumanalyse, die Markov-Theorie und die Petri-Netze genügen diesem Kriterium nicht.

Ein Modell muss zudem die Abbildung von Funktionen unterstützen, da diese Art der Modellierung eines Produktionssystems im Rahmen dieser Arbeit als Basis angesetzt wurde. Die Modelle Abnutzungsvorrat sowie die Effektivitätsbeurteilung sind daher als unzureichend zu beurteilen.

Der nutzungsbegleitende Einsatz ist für die Modellierungstechniken der Maschinenfähigkeit und für das Markov-Modell nur schwer zu verwirklichen. In vielen Fällen fehlt eine ausreichende Datengrundlage zum Ausfallverhalten der Teilsysteme, da die notwendigen statistisch zuverlässigen Untersuchungen sehr aufwändig sind. Dieser Mangel betrifft insbesondere die auf der Ausfallrate $\lambda(t)$ basierenden statistischen Modelle (Bool'sches Modell, Markov-Modell). Daher lassen sich die Methoden des Zuverlässigkeitsmanagements für eine Zustandsuntersuchung während der Nutzungszeit nur eingeschränkt anwenden [Ebner96, Lamb95]. Hinzu kommt, dass das Modell immer den aktuellen Änderungen an der Anlage nachgeführt werden muss.

Auch die Methoden der Überwachung und Diagnose zur kontinuierlichen Zustandsbewertung können anhand der fünf Kriterien der in Kapitel 1.4 vorgestellten Prinzipien einer Zustandsverfolgung bewertet werden (Tabelle 8).

Generell gilt, dass Methoden der Überwachung und Diagnose mit dem Ziel entworfen werden, eine automatisierte Reaktion auf unerwünschte Zustände zu erhalten. Infolge der impliziten Zustandsbewertung zeigt die Kriterienbewertung eine gute Unterstützung des Instandhaltungszyklus. Schwächen sind im Bereich der Datenakquisition zu erkennen. Hier sind in den meisten Fällen manuelle Eingaben erforderlich.

Infolge des massiven Aufwands, der bei Initialisierung der Methoden „Wissensbasierte Diagnose“ und „Analytische Redundanz“ entsteht, sind diese Techniken derzeit nur in wenigen Fällen im Einsatz. Hinzu kommt, dass die grundlegenden Modelle immer den Änderungen an der Anlage aufwändig nachgeführt werden müssen. Auch für die Pflege der Wissensbasis müssen zusätzliche Tätigkeiten durchgeführt werden. Aufgrund dieses hohen, schwer kalkulierbaren, administrativen Aufwands ist ein flächendeckender Einsatz dieser Techniken als Werkzeug der Instandhaltungsanalyse nicht sinnvoll.

Tabelle 8 Übersicht: Eignung der Überwachungs- und Diagnosemethoden zur Zustandsbewertung

	Objektive Überwachung	Subjektive Überwachung	Strukturbasierte Diagnosemethoden	Wissensbasierte Diagnosemethoden	Analytische Redundanz
Sollgrößen dokumentiert	j*	-	j*	j*	j
Istgrößen dokumentiert	j	-	j*	j	j
Unterstützt Soll-Ist-Vergleich	j	j**	j	j	j
Funktionen als Modellelement	n	n	j	n	j
Nutzungsbegleitender Einsatz möglich	j	j	j	j***	j***
Maßnahme ableitbar	j	j	j	j	j

j* - Nur verfügbar nach manueller Eingabe.

j** - In Form der subjektiven Bewertung.

j*** - Nach heutigen Wissensstand nicht im Breitereinsatz.

Die reinen Überwachungsmethoden (objektive und subjektive Überwachung) lassen sich kaum zur Einhaltung von funktionsorientiert formulierten Soll-Modellen einsetzen, da sie per se Komponenten überwachen müssen. Nur über subjektive Überwachung ist hier eine Möglichkeit gegeben.

Allein die strukturbasierten Methoden können alle beschriebenen Anforderungen der Zustandsbewertung erfüllen. Haupthindernis bei ihrem Einsatz in der Instandhaltungspraxis ist der Mangel an geeigneten, ausgereiften Strukturmodellen. Diese Strukturmodelle müssen zum einen für jeden Anlagentyp neu entwickelt werden, zum anderen auch während des gesamten Lebenszyklus nutzbar sein. Obwohl während der Maschinenentwicklung ähnliche Modelle, die den Soll-Zustand beschreiben, erarbeitet werden, greift die Instandhaltung auf diese Informationen kaum zurück oder muss sie an ihre Bedürfnisse anpassen. Wesentliche Ursache dieser Situation ist die gegenüber der jungen Technik der Produktmodellierung lange Lebensdauer von Produktionsanlagen, denn für ältere Anlagen existieren keine Modelle. Um diese Lücke zu schließen, müssen konkrete Abbildungen von Produktionsanlagen in einem Produktmodell und

entsprechende Anwendungssoftware vorliegen, bevor die Anwender Nutzen über Konstruktion und Angebot hinaus erkennen.

Von konzeptioneller Seite ist zu bemerken, dass grundlegende Instandhaltungsorientierte Konzepte bislang unternehmens- oder softwaresystemspezifisch entworfen wurden, so dass ein Bezug zu standardisierten Konstruktions- oder Produkt-Daten-Management-Systemen nicht besteht. Ferner bemängeln die Instandhalter, dass die Modelle veralten, und somit erhebliche Abweichungen zwischen Realität und Modell entstehen. Daher ist eine Integration von Modellpflege und täglicher Arbeit in der Instandhaltung notwendig, wenn mit Modellen dauerhaft gearbeitet werden soll. Ein einfaches, dennoch wirkungsvolles Konzept zur Administration der vorhandenen Daten ist bislang noch nicht entwickelt.

Für Schwachstellenanalyse und zustandsorientierte Instandhaltung schlagen die Arbeiten zum Instandhaltungsmanagement aggregierte Kennzahlen vor. Eine Beachtung der Konfiguration der untersuchten Maschinen findet nicht statt. Vielmehr verwenden alle diese Ansätze die „natürliche Gliederung“ des Inventars in Einzelmaschinen²². Eine weitergehende Gliederung oder Hierarchisierung der Anlageneigenschaften erfolgt nicht, so dass die direkte Verwendung der Erkenntnisse aus Überwachungs- und Diagnoseprozessen zur technischen Bewertung nur in spezialisierten Anwendungen möglich ist [Zöllner92]. Für ein durchgängiges Zustandscontrolling fehlt eine Systematik, die die Anforderungen einer Fertigungskette (das Soll) mit dem aktuellen Zustand (dem Ist) zusammenführt. Gerade dies ist jedoch für eine erfolgreiche zustandsorientierte Instandhaltung erforderlich.

²² Dieser Punkt deckt sich mit Kuhns Frage nach der richtigen Aggregationsebene für Felddaten [Kuhn06].

3 Bestimmung von Merkmalsmenge und der Merkmalsausprägung

Um die aufgezeigten Lücken in der Verarbeitung von Zustandsdaten zu füllen, wird nun eine Systematik ausgearbeitet, die eine kontinuierliche Zustandsbewertung von Produktionsanlagen ermöglicht. Ziel dieser Methode ist, für ein gegebenes Produktionssystem den hinreichenden Zustand (Definition 4) nachzuweisen. In den folgenden Unterkapiteln wird zunächst dargelegt, wie für ein Produktionssystem der Sollzustand ermittelt werden kann. Danach wird vorgestellt, welche Informationen zum Ist-Zustand verfügbar sind. Beide Themen werden dann in Kapitel 4 zusammengeführt. Dort wird gezeigt, wie aus den erhobenen Informationen der Bedarf an Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden kann.

Um die während der Methodenentwicklung definierten, abstrakten Begriffe anschaulich darzustellen, wurde ein Szenario entworfen, das die gesamte Methodenentwicklung begleitet. Vor dem Beginn der eigentlichen Methodendiskussion steht daher eine kurze Einführung in das Szenario.

3.1 Einführung in das Anwendungsszenario

Das Produktionssystem, dem das Anwendungsszenario entnommen ist, fertigt Turbinenschaufeln. Ein typisches Produkt stellt Abbildung 24 dar. Infolge der aerodynamisch bestimmten Auslegung existiert eine Vielzahl von möglichen Produkten, die typischerweise nach Fertigungsgesichtspunkten in Cluster gegliedert werden können. Als typische Verschleißteile werden Turbinenschaufeln zudem in großer Zahl produziert.

Das Szenario umfasst Arbeitsschritte und Produktionsanlagen für die spanende Bearbeitung dieser Werkstücke. Charakteristisch sind die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Flächen des Fußes bei gleichzeitig schwer zu zerspanendem Werkstoff (Abbildung 25). Infolge der Sicherheitsrelevanz dieser Teile findet vor Auslieferung eine Prüfung auf Risse und Maßhaltigkeit statt.

Für das Produkt *HD-Turbinenschaufel* sind drei Plan-Schleifmaschinen und eine Messmaschine in einer Fertigungskette angeordnet. Die Schleifbearbeitung am Fuß und an der Schulter erfolgt auf den ersten beiden Maschinen und wird durch die Bearbeitung an der Schaufelspitze und der Austrittskante auf der dritten Maschine abgeschlossen. Im unmittelbaren Anschluss werden die Teile auf einer Messmaschine qualifiziert, um weitere Wertschöpfung an Ausschussteilen zu vermeiden. Für die insgesamt 4 Arbeitsfolgen werden 2 Werker benötigt, die in einer Taktzeit von ca. 5 Minuten alle Maschinen bedienen. Alle Schleifmaschinen sind an eine zentrale Kühl-Schmierstoff-Versorgung angeschlossen. Da alle drei Schleifmaschinen ähnliche Funktionen abarbeiten, beschränken sich viele folgende Beispiel auf die erste Schleifoperation, die Fertigung des Fußprofils.

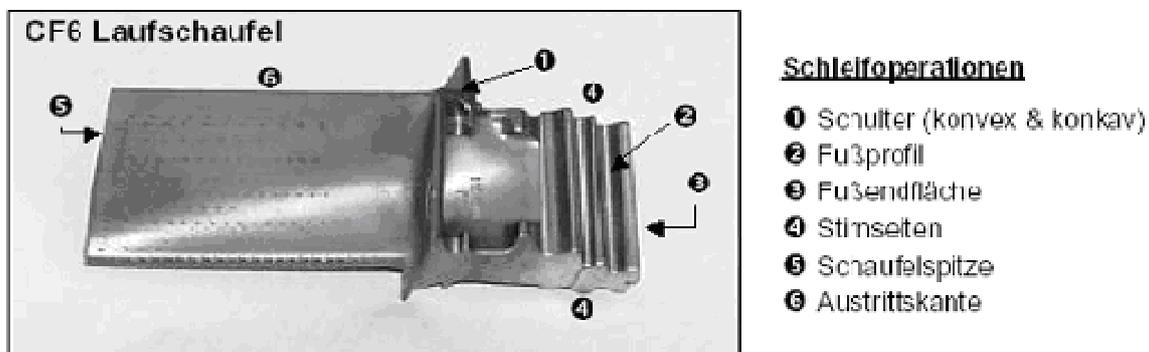


Abbildung 24 Schleifarbeitsfolgen an einer Hochdruck-Turbinenschaufel
(Quelle: [Wagner04] und Lufthansa)

	IN 713	IN 100	M 247	PWA1484	CMSX 10
	polykrist.	polykrist.	DS*	SX**	SX 3.gen.
Programmstart:	1955	1959	1975	1990	1997
max.Temp. (°C):	970	1000	1035	1095	1125
Dichte (g/ cm ³):	7.91	7.75	8.54	8.95	9.05
max. Temp. (°C):	970	1000	1035	1093	1125
für 100 h/ 140 MPa Zeitstandsfestigkeit					
Preis (€/ kg):	13	19	30 ¹⁾	115 ¹⁾	180 ¹⁾
(Vormaterial)		-	20 ²⁾	70 ²⁾	105 ²⁾
Bemerkungen:	-		* gerichtet erstarrt	** Einkristal	1) 100 %Virgin Mat. 2) 50 % Virgin Mat +50 %Rücklauf

Abbildung 25 Superlegierungen für feingegossene Lauf- und Leitschaufeln
(Quelle: [Steffens04])

3.2 Merkmalsmenge einer Fertigungskette

Um die zustandsbeschreibenden Merkmale und damit die Merkmalsmenge eines Produktionssystems (s. Definition 3) herauszuarbeiten, müssen die einzelnen Arbeitsschritte der Fertigung betrachtet werden. Als Arbeitsunterlage dienen dabei vorrangig Arbeitspläne sowie technische und arbeitsorganisatorische Richtlinien. Weitere Hilfsmittel sind grundlegende Einteilungen z.B. nach Aggteleky, die die Anforderungen an die technischen Komponenten von Produktionsanlagen strukturieren [Aggteleky87] (vgl. Kapitel 1.5 und Abbildung 34).

Bei der Definition und Erfassung der Anforderungsfunktionen ist ein Gestaltungsspielraum vorhanden, innerhalb dessen die Zuordnung von Merkmalen zu Funktionen erfolgen kann. Um in dieser Situation Entscheidungen zu vereinfachen, wird die Leitfrage *„Was ist für die vollständige Abarbeitung eines beliebigen Fertigungsloses notwendig?“* vorgegeben. Durch diese Entscheidungshilfe wird sichergestellt, dass das kleinste logistische Planungselement „Fertigungslos“ abgearbeitet wird.

Um den Soll-Zustand für Anlagen zu ermitteln, sind für jeden Arbeitsschritt die notwendigen Funktionen und Teilfunktionen zu spezifizieren. Tabelle 9 zeigt für die zweite Schleifoperation „Fußprofil“ des Anwendungsszenarios diese Spezifikation. Sie enthält die vier Hauptfunktionen „Bearbeiten“, „Kühlschmierung“, „Rüsten“ sowie „Allgemeines“, die in insgesamt 17 Teilfunktionen zerlegt werden können. Die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit jeder Teilfunktion kann nun mit einem messbaren Merkmal hinterlegt werden (Tabelle 9, Spalten Ausprägung). Für die Dokumentation bietet sich für die Ausprägungen eine Darstellung nach [Brunkhorst95] mit differenzierten nominalen und metrischen Merkmalen an. Diese Unterteilung ermöglicht, dass nominale Merkmale durch einfaches „Abhaken“ kontrolliert werden können. Nur metrische Merkmale erfordern einen zusätzlichen Messschritt.

Tabelle 9 Anforderungstabelle für Schleifoperation „Fußprofil“

		Effektivitätsanforderung		Ausprägung	
Funktion		Teilfunktion	Nominal	Metrisch	
1	Werkstück bearbeiten	X-Achse (Pendelbewegung)		3000mm	
2		Z-Zustellung		30mm	
3		Y-Zustellung		30mm	
4		Werkzeug: Soll-Geometrie einstellen und halten	Abrichten mit Continuous Dressing		
5		Abtragen		Q > 25 mm ³ /min	
6	Werkstück prüfen	Messen		Q-Merkmale nach Prüfplan	
7		Protokollieren			
8	Kühlschmierung	KSS ²³ fördern		500 l/h	
9		Späne abführen		Spanmenge (s. Zeile 5)	
10		KSS aufbereiten	Zentrale KSS-Anlage	500 l/h	
11	Rüsten und Laden	Werkstücke spannen		1 Los = 35 Stck Haltekraft > 1300 N	
12		Werkzeug wechseln		Wechselzeit < 25 min	
13		Beladen		Be/Entladen hauptzeitparallel	
14		Entladen			
15	Allgemein	Ergonomie einhalten	Entsprechend aktuellen Richt- linienstand		
16		Betriebssicherheit			

Als beachtenswert erweisen sich die Funktionen 11 und 4 (Tabelle 9). Die Abrichteinrichtungen werden infolge der Werkstoffe häufig benötigt, sie sichern die Maßhaltigkeit.

²³ KSS - Kühlschmierstoff

Zudem ist das Spannen herausfordernd, da die Freiform-Geometrie nicht zum Spannen herangezogen werden darf, der Fuß jedoch bearbeitet werden soll. Hier werden z.T. produktspezifische, hydraulische oder pneumatische Spannvorrichtungen eingesetzt. Diese sind kein originärer Teil der Produktionsanlage. Im ersten Ansatz kann als Anforderung gesetzt werden, dass die Spannvorrichtung ein komplettes Fertigungslos aufnehmen kann²⁴. Aus technischen oder logistischen Gründen ist die Losgröße produktspezifisch und die Losgrößensetzung kann nicht für alle Produkte erfüllt werden. Um alle Produkte bearbeiten zu können, wird in diesem Fall ein Rüstplatz eingerichtet, der hauptzeitparalleles Spannen ermöglicht. Dieser braucht eine Beladeinrichtung und weitere entsprechende Vorrichtungen als Teil des Arbeitsplatzes.

Zu definieren sind noch die Effizienzmerkmale. Diese Kennzahlen werden z.B. übergeordneten betrieblichen Zielen abgeleitet. Hier wurde als Effizienzmerkmal angesetzt, die Instandhaltungskostenrate kleiner als 4,0% zu halten. Für die Nettoproduktivzeit wurde eine untere Grenze von 75% festgelegt. Alle Merkmale zusammen bilden die Merkmalsmenge für die Schleifoperation „Fußprofil“ des Anwendungsszenarios.

In dieser Form lässt sich jeder Arbeitsplan in eine Menge von Anforderungsfunktionen und Merkmalen umsetzen. Da es dabei unerheblich ist, wie die einzelnen Funktionen realisiert sind, lässt sich der Ansatz über Fertigungsketten auf ein gesamtes Produktionssystem ausweiten. Statt eines einzelnen Arbeitsschrittes betrachtet man dann alle Schritte einer Fertigungskette. Zunächst müssen dazu Fertigungsketten identifiziert werden. Entsprechend Definition 1 ist für jedes Produkt genau eine Fertigungskette gegeben. Sie wird durch einen oder mehrere Arbeitspläne beschrieben. Entsprechend des Ansatzes lässt sich eine Fertigungskette auf einer feineren Detaillierungsebene als eine Sequenz von Funktionsnutzungen darstellen (Abbildung 26). Für die bereits betrachtete Merkmalsmenge des Szenarios illustriert Abbildung 27 diesen Zusammenhang.

Für die Instandhaltung ist diese Darstellungsform besonders interessant, da irrelevante (Maschinen-)Funktionen ausgeblendet werden. Würde man die Fertigungskette als eine Sequenz von Produktionsanlagen darstellen, würden alle vorhandenen, aber ggf. nicht genutzten Funktionen der Anlagen mit abgebildet und unnötigerweise in der Instandhaltung berücksichtigt.

²⁴ Losgrößensetzung: Fertigungslos = Rüstlos.

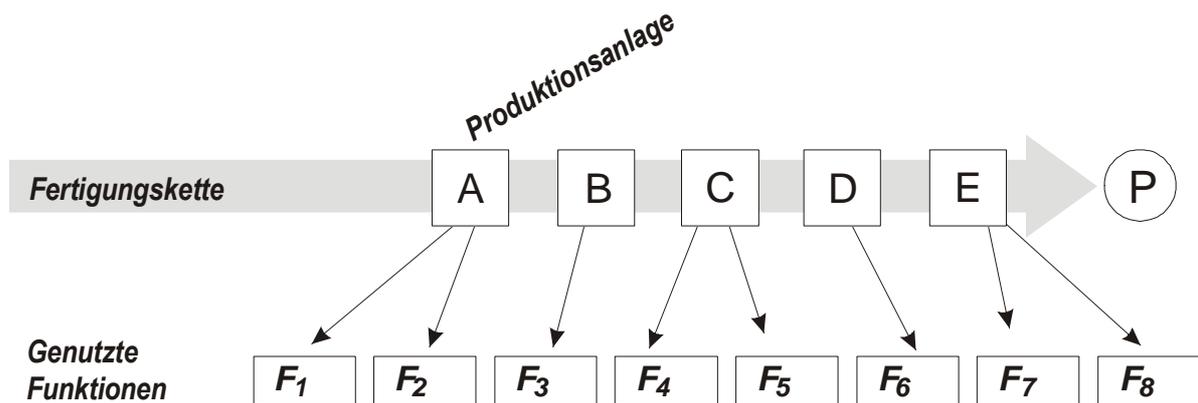


Abbildung 26 Fertigungskette für ein Produkt P mit den Produktionsanlagen A-E als Abfolge der Funktionen F_1 - F_8

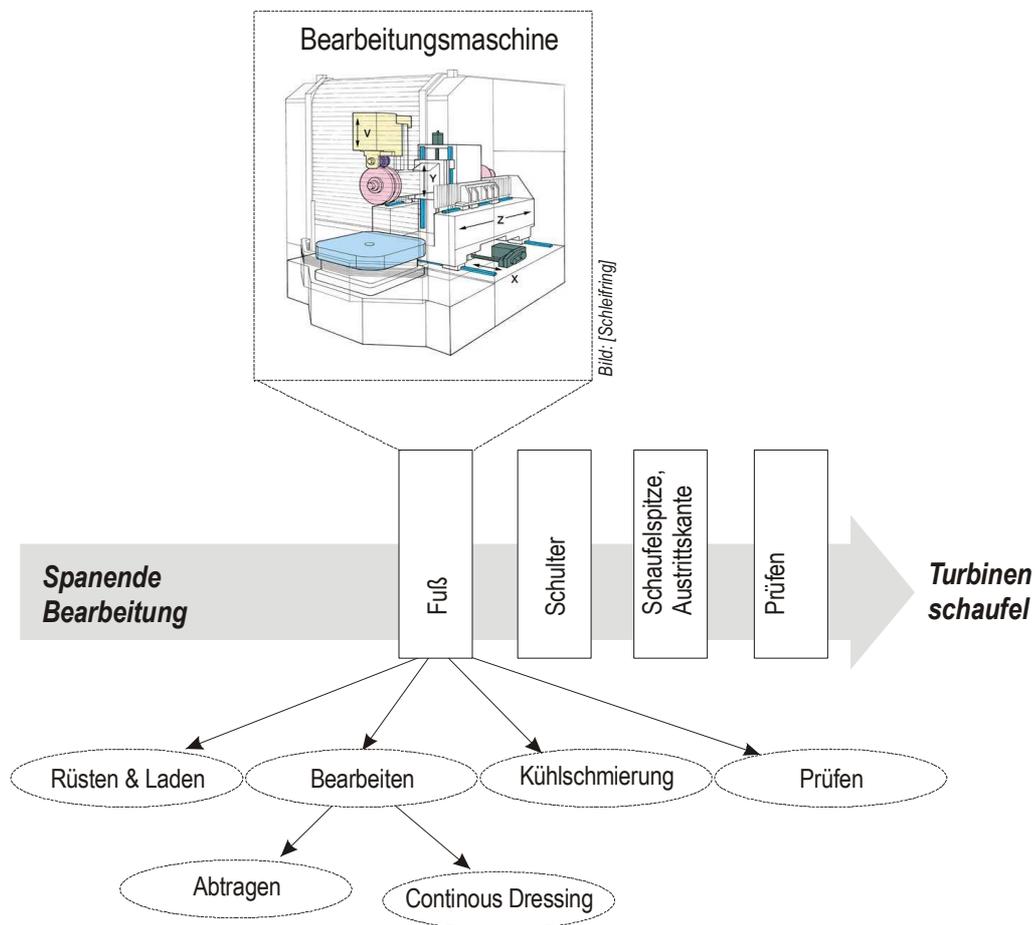


Abbildung 27 Funktionsorientierte Fertigungskette für das Szenario (Ausschnittsweise, vgl. Abbildung 24 und Tabelle 9)

Mit Hilfe der funktionsorientierten Darstellung von Fertigungsketten lassen sich die Anforderungen der Produktion an die vorhandenen Maschinen und Anlagen präzisieren. Jede Funktion, die in einer Fertigungskette abgerufen wird, muss mit den vorgegebe-

nen Parametern durchführbar sein. Eine implizite Beschreibung der Funktionen und der Parameter ist in den Arbeitsplänen enthalten, die eine Fertigungskette definieren. Diese Arbeitspläne müssen analysiert werden, um die gesuchte Merkmalsmenge zu bestimmen. Dies kann in der eingangs dargestellten Art und Weise geschehen. Jeder Funktion bzw. Teilfunktion wird dabei mindestens ein messbares Merkmal zugeordnet. Das Ergebnis dieser Analyse ist die Merkmalsmenge der betrachteten Fertigungskette. Diese Merkmalsmenge wird dann von der Instandhaltung verwendet, um einen Soll-Ist-Abgleich durchzuführen.

3.3 Berücksichtigung vernetzter Fertigungsketten

Die Ableitung von Merkmalsmengen aus Arbeitsplänen betrachtete einzelne Fertigungsketten und vernachlässigte die *Vernetzung der Fertigungsketten* in einem Produktionssystem. Der Begriff Vernetzung drückt aus, dass Anforderungen aus unterschiedlichen Fertigungsketten in die Anforderungen an eine einzelne Produktionsanlage einfließen: In einer Mehrproduktfertigung wird nur in wenigen Fällen auf einer Produktionsanlage nur ein einziges Produkt gefertigt. Diesen Sachverhalt illustriert Abbildung 28 (oben). Hier müssen die Knoten A und D Anforderungen aus der Fertigung der Produkte P_1 und P_2 erfüllen. Dies wird in der Darstellung als Fertigungsnetz deutlich. Um die Effekte der Vernetzung in der Anforderungsanalyse zu berücksichtigen, müssen die Anforderungen der einzelnen Prozessketten zu einer widerspruchsfreien und eindeutigen Aussage zusammengeführt werden [Tönshoff99, Masan99].

Die Anforderungsanalyse erfolgt in 3 Schritten (Abbildung 28). Ausgangspunkt sind funktionsorientiert dargestellte Fertigungsketten, wie sie im vorangegangenen Kapitel entwickelt wurden. Im ersten Schritt werden die gemeinsam verwendeten Funktionen herausgearbeitet. Es ergibt sich durch diesen Schritt eine Darstellung des untersuchten Produktionssystems als Fertigungsnetz. Im zweiten Schritt werden die Soll-Merkmale der einzelnen Funktionen gegenüber gestellt. Für jedes Soll-Merkmal ist dann die anspruchsvollste Ausprägung (z.B. höchste Genauigkeitsanforderung) als Anforderung in allen Fertigungsketten zu setzen.

Im letzten Schritt der Anforderungsanalyse werden alle Funktionen in jeweils einer Menge zusammengefasst, die in allen Fertigungsketten in gleichartiger Abfolge verknüpft sind (Abbildung 29). Diese Menge von Anforderungsfunktionen soll als *Arbeitsplatz* bezeichnet werden:

Definition 11 Arbeitsplatz

Ein Arbeitsplatz ist definiert durch die Menge von Anforderungsfunktionen, die für alle Fertigungsketten gleichartig verknüpft sind.

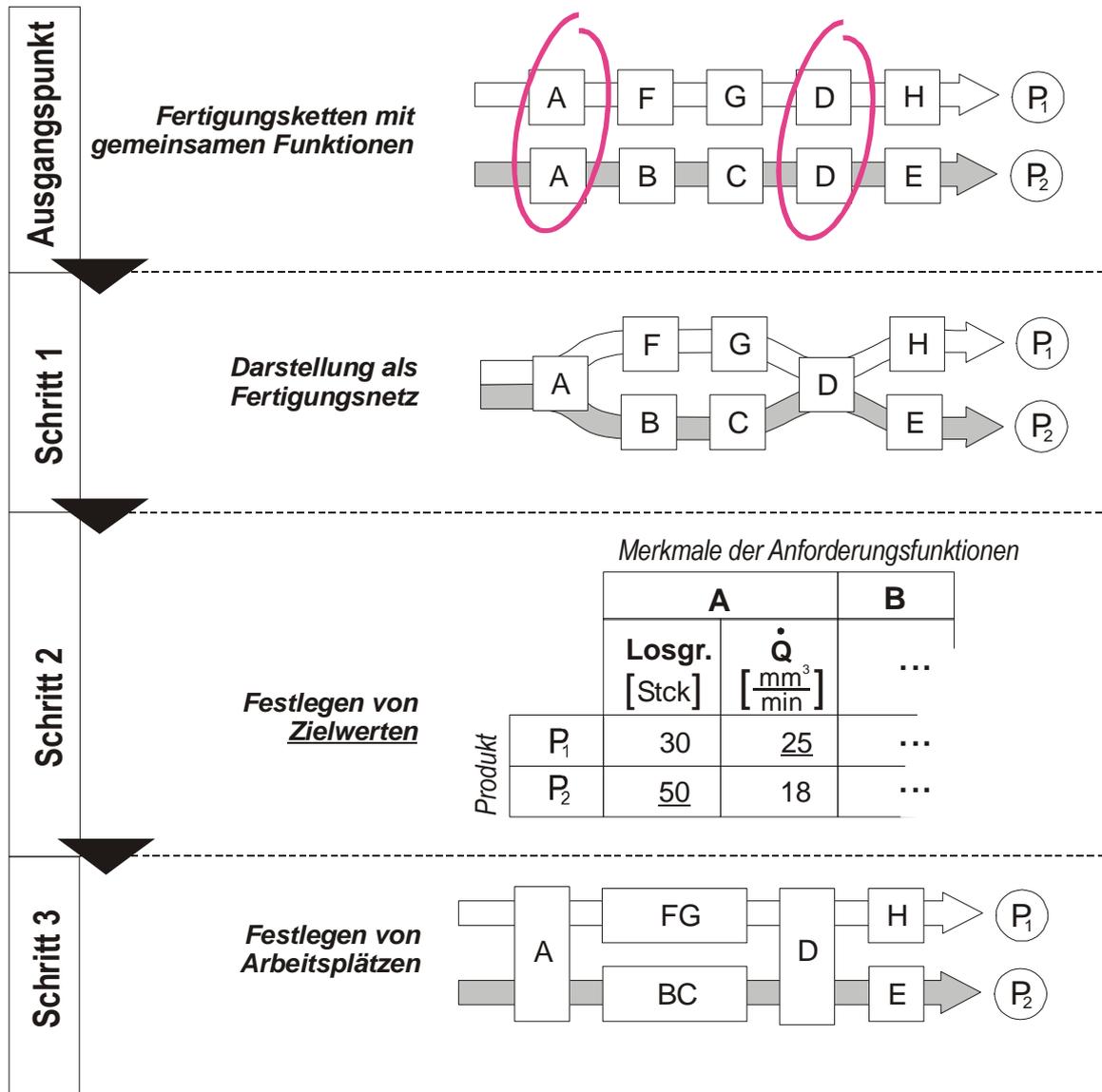


Abbildung 28 Ableitung von Anforderungsfunktionen in einer vernetzten Fertigung

Der konkrete Umfang der ermittelten Arbeitsplätze ist abhängig von den untersuchten Fertigungsketten. In Abbildung 29 werden beispielsweise die Funktionen B und C immer gemeinsam genutzt. Werden jedoch nur die Fertigungsketten P₁ und P₃ betrachtet, ergeben sich die 4 Arbeitsplätze {A;B;C}, {D}, {E}, [F]. Ein Arbeitsplatz ist auch nicht zwingend auf eine einzelne Produktionsanlage begrenzt, vielmehr können in einem Arbeitsplatz eine oder mehrere Maschinen und ihr Umfeld beschrieben sein. Im Beispiel-

szenario ist daher die KSS-Aufbereitungsanlage dem Arbeitsplatz hinzuzurechnen, obwohl sie physikalisch eine zentrale Anlage ist.

Da der Begriff des Arbeitsplatzes die Anforderungen verschiedener Fertigungsketten integriert, ist der Arbeitsplatz ein geeigneter Gliederungsbegriff für die Merkmale eines Produktionssystems.

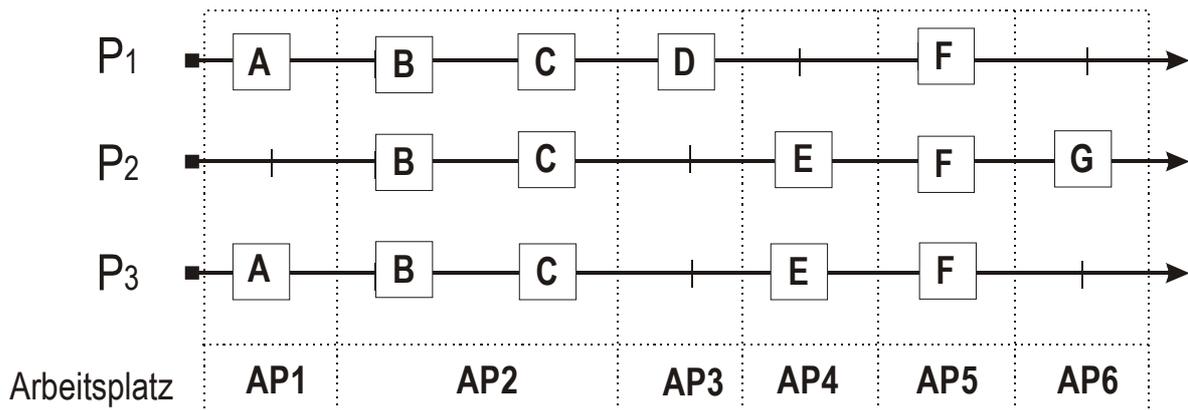


Abbildung 29 Arbeitsplätze dreier Fertigungsketten mit unabhängigen Zuständen

3.4 Folgerungen für die Instandhaltung

Das vorangegangene Unterkapitel zeigte, dass sich aus der Kenntnis der durch Arbeitspläne beschriebenen Fertigungsketten eine grundlegende Strukturierung eines Produktionssystems in Arbeitsplätze ableiten lässt. Für die Instandhaltung ergibt sich weiterhin eine Aufstellung der Soll-Merkmale dieser Arbeitsplätze. Anhand der Erfüllung dieser Merkmale können Instandhalter feststellen, ob Maßnahmen notwendig sind.

Für einen Arbeitsplatz gilt, dass er nur dann insgesamt funktionsfähig ist, wenn alle ihm zugeordneten Anforderungen erfüllt sind. Bleibt nur eine Anforderung unerfüllt, so kann der Arbeitsplatz nicht produktiv arbeiten. Daraus folgt auch, dass die in einem Arbeitsplatz beschriebene Funktionsfolge einen gemeinsamen Zustand hat. Für die Zustandbewertung bedeutet dies, dass es nicht erforderlich ist, in jedem Fall die Gesamtheit der Merkmale eines Produktionssystems zu betrachten. Es ist ausreichend, bei der Zustandbewertung immer nur die Merkmale eines Arbeitsplatzes simultan zu betrachten und ihre aktuelle Ausprägung zu bewerten.

Da die Gliederung in Arbeitsplätze rein unter dem Aspekt der Zustandsverfolgung erfolgte, muss sich diese Gliederung nicht mit einer vorhandenen, logistisch begründeten

Gliederung decken. Für das Instandhaltungsmanagement ergeben sich damit zwei Handlungsalternativen:

- (A) Aufbau und Verwaltung einer eigenen Arbeitsplatzgliederung.
- (B) Übernahme der bestehenden, unter Gesichtspunkten der Instandhaltung ggf. nicht korrekten, logistisch motivierten Arbeitsplatzstruktur.

Alternative A würde bedeuten, in der Instandhaltung eine eigenständige Administration der Arbeitsplatzstammdaten einzuführen. Damit würde auch auf Synergien einer gemeinsamen Datenbasis mit anderen Informationssystemen der Produktion verzichtet. Ein theoretisch-methodischer Vorteil dieses Vorgehens würde in der Praxis jedoch durch die Kosten einer Doppeladministration zunichte gemacht. Aus Unternehmenorganisatorischen Gründen ist für die Praxis die Alternative A nicht empfehlenswert.

Der Erkenntnisgewinn durch den gerade erarbeiteten Strukturbegriff des Arbeitsplatz ist jedoch erheblich. Mit seiner Eigenschaft als eine Menge von Anforderungsfunktionen ermöglicht er ein einfaches „Teile und Herrsche“ der ansonsten unübersichtlichen Merkmalsmenge eine Fertigungssysteme möglich wird. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit ist damit ein Arbeitsplatz das größte Strukturobjekt, das betrachtet werden muss. Für die Fortführung des Beispielszenarios wird daher lediglich der erste Arbeitsschritt (Fuß bearbeiten, vgl. Abbildung 27) betrachtet.

3.5 Erfassung von Merkmalsausprägungen

Nachdem bekannt ist, welche Merkmale ein Arbeitsplatz ausweisen muss, ist für den erfolgreichen Betrieb nachzuweisen, dass diese Merkmale auch vorhanden sind. Diese Ermittlung der Ist-Ausprägung ist eine Tätigkeit, die Instandhalter ständig im Rahmen ihrer Tätigkeiten ausführen (Tabelle 10). Um kontinuierlich den aktuellen Zustand zu ermitteln, können Instandhalter zudem auf Rückmeldungen (z.B. Störungsmeldungen) aus der Produktion zurückgreifen: *Felddaten* können aus fast allen produktionsnahen Systemen gewonnen werden (Abbildung 30). Sie entstehen häufig nebenläufig zum eigentlichen Instandhaltungsprozess und erfordern keinen eigenen, primären Erfassungsaufwand in der Instandhaltung. Aufwändig und häufig vernachlässigt ist jedoch die Auswertung aller verfügbarer Felddaten.

Tabelle 10 Tätigkeiten in der Instandhaltung und enthaltene Zustandsaussagen
[nach Troppens02]

Tätigkeit	Aussagen zu
Aufstellung u. Anschlüsse	Standort/Umfeld, Ausrichtung, Wuchtung, Dichtheit, elektrische Kontakte, Befestigung, Vollständigkeit, spezielle Inspektionen u.a.
Anfahren, Inbetriebnahme und nachfolgende Bedienung, Varianten der Fahrweise	Funktionsfähigkeit, Anfangszustand mittels spezieller Inspektionen (Drücke, Schwingungen, Temperaturen u.a.), subjektive Eindrücke, Kenngrößen der Überwachung und Steuerung, Einschätzung erbrachter Leistungen
Kontrolle der Betriebskenngrößen	Sichere und ökonomische Betriebsweise, richtige automatische Steuerung
Überwachung, Inspektionen nach Plan oder bei Ereignissen	Sicherheit, Schädigungszustand, notwendige Wartungen u. Instandsetzungen
Veränderungen des Betriebes	Wie bei Inbetriebnahme und Kontrolle der Betriebskenngrößen
Demontagen, Instandsetzungen, Modifikationen	Wie bei Inspektionen und dann wie bei Aufstellung und Inbetriebnahme

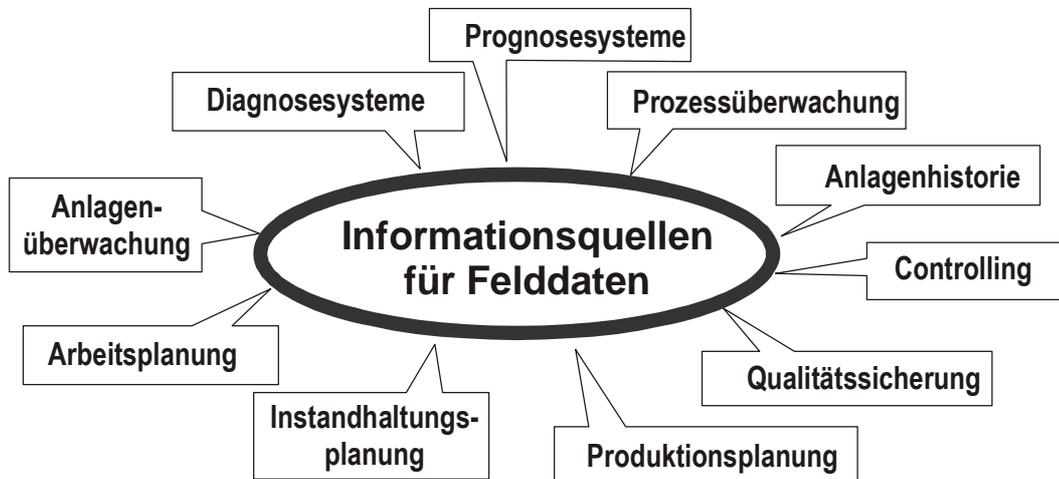


Abbildung 30 Informationsquellen für zustandsbeschreibende Felddaten

Unter Berücksichtigung der Vielfalt der Quellsysteme werden in diesem Kapitel die Eigenschaften von Felddaten untersucht und ihre direkte Anwendung in der Instandhaltungsanalyse beschrieben. Zunächst werden die Attribute eines Felddatums beschrieben, die mindestens notwendig sind, um eine Zustandsänderung wahrnehmen zu können. Anschließend werden die verfügbaren Datenquellen hinsichtlich ihrer Prozesssicherheit für die Instandhaltungsanalyse betrachtet.

3.5.1 Informationsquellen für Felddaten

Zunächst sollen die Informationsquellen dahingehend untersucht werden, inwieweit sie Felddaten liefern und welchen systematischen Fehlern diese unterliegen. Für die Bewertung des systematischen Fehlers ist es wichtig zu betrachten, wie exakt eine Zustandsänderung durch ein Felddatum eingrenzt wird. Für die Merkmalsausprägung selbst wird ein quantisiertes Zustandsmodell angesetzt (Abbildung 31). In diesem Modell ist die Merkmalsausprägung nur zu bestimmten Zeitpunkten bekannt. Abbildung 31 veranschaulicht diese Modellvorstellung am Beispiel „Reifenprofiltiefe“ eines Kraftfahrzeugs. Der Verschleiß zwischen 8/04 und 10/04 beträgt 2mm, dieses Änderungsquantum ist objektiv durch Messung bestimmt. Ob der Verschleiß gleichmäßig auftrat (Strichpunktlinie) oder sich nicht-linear²⁵ (Punktlinie) auf die Zeit zwischen den Beobachtungen verteilte, bleibt unbekannt. Da die Modellierung des Verlaufs detaillierte Informationen über Einsatzbedingungen erfordern, werden keine Annahmen über ihn getroffen²⁶.

Die beobachtete Ausprägung eines Merkmals verändert sich nicht stetig, sondern sprunghaft zum jeweiligen Beobachtungszeitpunkt t_0 . Zu diesem Zeitpunkt entsteht ein neues, eine Zustandsänderung beschreibendes Felddatum. Um aus diesem Felddatum den neuen Zustand - die neue Merkmalsausprägung - bestimmen zu können, müssen das veränderte Merkmal, der Zeitpunkt t_0 und das Änderungsquantum ζ beschrieben sein. Diese drei Attribute werden im folgenden näher erläutert und ihre prinzipiellen Vertrauensgrenzen diskutiert.

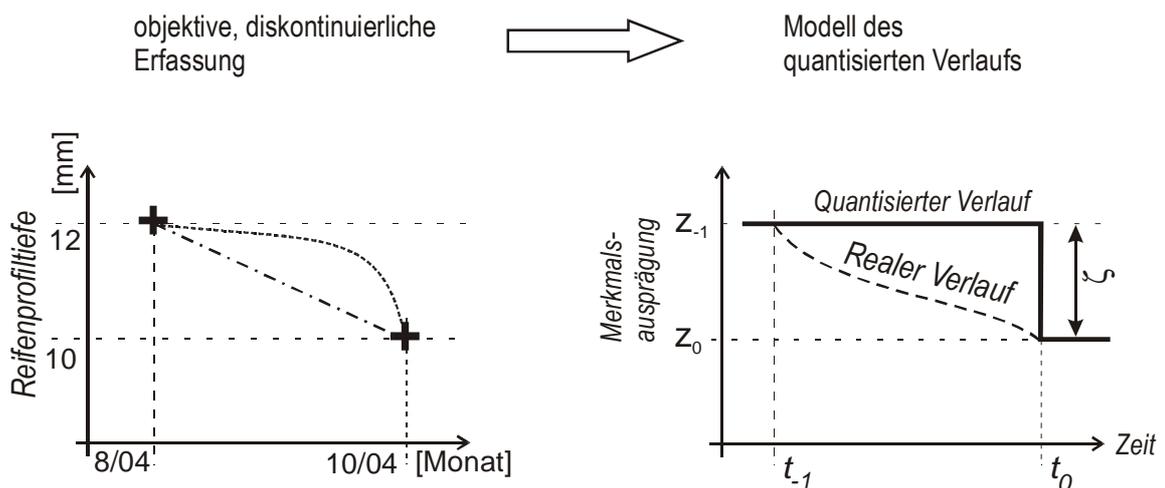


Abbildung 31 Quantisiertes Zustandsmodell

²⁵ Der punktierte Verlauf lässt sich z.B. deuten als zunächst seltene Nutzung des Kfz, gefolgt von einer Phase starker, fahrstilbedingter Abnutzung.

²⁶ Zur Problematik der Ermittlung von Verlaufskurven siehe Kapitel 2.1.1.1 (Abnutzungsvorrat).

Während der Erfassung eines Felddatums wird im allgemeinen ein Ort notiert, an dem es entstand. Dieser *Bezug*(-spunkt) benennt die konkrete Maschine oder Maschinenteilkomponente, deren Merkmal sich änderte. Nur über den Bezug kann überhaupt eine Zurechnung zu einem Merkmal stattfinden. Generell gilt, dass ein Bezug ein möglichst kleines Teilsystem einer Anlage referenzieren soll, um eine genaue Zurechnung zu ermöglichen. Im idealen Fall benennt der Bezug unmittelbar ein Merkmal, das bereits als Soll-Merkmal definiert wurde. Dieser Fall tritt jedoch nur selten ein, in den meisten Fällen werden Produktionsanlagen bzw. ihre Komponenten referenziert.

Jede Zustandsänderung entsteht zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Felddatum, das diese Änderung beschreibt, wird den Zeitpunkt der Erfassung der Zustandsänderung beschreiben und nicht den Zeitpunkt des Eintretens. Dieser systematische Fehler ist nicht zu vermeiden, da ein Felddatum erst nach einer Zustandsänderung erfasst werden kann.

Die Größe des Fehlers hängt von der Methode ab, mit der das jeweilige Felddatum erfasst wurde. Wird ein automatisiertes, objektives Überwachungssystem verwendet, kann der Fehler klein sein. Wird manuell erfasst, hängt der Fehler vom Verhalten des jeweiligen Maschinenbedieners ab. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass der späteste Meldezeitpunkt das Schichtende ist. Der größte zu erwartende Fehler kann (im Dreischichtbetrieb) bei 8 Stunden angesetzt werden. Zustandsänderungen können also maximal tag- bzw. schichtengenau beschrieben werden. Der Anspruch einer detaillierteren Erfassung geht mit einer unverhältnismäßigen Erhöhung des organisatorischen Aufwands einher.

Um den aktuellen Ausprägungswert z_0 zu bestimmen kann entweder z_0 direkt gemessen werden oder eine inkrementelle Bestimmung mit $z_0 = z_1 - \zeta$ erfolgen. Während die direkte Messung unproblematisch ist, summieren sich bei inkrementeller Bestimmung zusätzlich die stochastischen Abweichungen auf. Aus diesem Grund ist die ausschließlich inkrementelle Erfassung von Merkmalsausprägungen nur dann zuverlässig, wenn das Inkrement ohne stochastischen Fehler ist. Dies ist z.B. bei Kostengrößen der Fall. In anderen Fällen sollte regelmäßig eine absolute Bestimmung der Ausprägung durchgeführt werden, um den systematischen Fehler zu minimieren.

Mit diesen Vorüberlegungen zu den prinzipiellen Eigenschaften von Felddaten können nun die Felddaten einzelner Quellsysteme näher betrachtet werden. Neben einer grundsätzlichen Beschreibung der Datenqualität soll insbesondere deren spezifischer Vertrauensbereich bewertet werden. Als Informationsquellen für Felddaten wurden aus den Systemen nach Abbildung 30 *objektive* und *subjektive Überwachung*, *Instandhaltungsplanung* und *-steuerung* sowie *Qualitätskontrolle* ausgewählt. Diese Systeme sind in Produktionsunternehmen weit verbreitet. Von einer Auswertung der Systeme BDE

und PPS wurde abgesehen, da hier die Zurechnung zu einer Anforderungsfunktion nicht einfach gelingt. Für deren Auswertung stehen jedoch die Methoden von Köhrmann zur Verfügung [Köhrmann00].

3.5.1.1 Objektive Überwachung

Die zunehmende Ausstattung von Produktionsanlagen mit objektiven Überwachungs- und Diagnosesystemen liefert zuverlässige Aussagen über den Zustand der überwachten Anlage. Vielfach ist ein automatisiertes, objektives Überwachungssystem in Produktionsanlagen integriert. Es erfasst kontinuierlich eine oder mehrere Messgrößen und ordnet sie Merkmalen zu. Beim Eintritt bestimmter, vordefinierter Grenzwerte oder Merkmalskombinationen löst das Überwachungssystem eine Meldung aus.

Typische Beispiele für Felddaten der objektiven Überwachung sind Maschinenfehlermeldungen. Die Hauptbearbeitungsmaschine des Beispielszenarios, die Schleimaschine, verfügt als CNC-Maschine über entsprechende Steuerungsfunktionen. Tabelle 11 zeigt typische Felddaten aus der objektiven Überwachung.

Tabelle 11 Beispiele für Felddaten aus objektiver Überwachung

Nr. ²⁷	Beschreibung ²⁸	Quellsystem	Bezug ²⁹	Zeitpunkt ³⁰	Störung der Fertigung
6	Auf Endschalter u. Lüfter CNC def. wechseln	OÜ	58	152	n
13	Einrollgerät defekt	OÜ	35	192	j

3.5.1.2 Subjektive Überwachung

Unter subjektiver Überwachung werden die Arbeitsweisen *Total Productive Maintenance* (TPM) und *Vorschlagswesen* betrachtet. Beide Arbeitsweisen setzen gezielt auf die Expertise des Werkers zur Überwachung kritischer Elemente und Schwachpunkte einer

²⁷ Nummern verweisen auf Zusammenfassung in Anhang A2.

²⁸ Alle Fehlerbeschreibungen wurden unkorrigiert aus realen Felddaten übernommen.

²⁹ Die Nummer Bezug referenziert auf den Anhang A4

³⁰ Zur Zeitdarstellung siehe Anhang A1.

Produktionsanlage. Beide Quellen sind daher hinsichtlich der systematischen Fehler, denen die Felddaten unterliegen, ähnlich.

Tabelle 12 zeigt einige Felddaten, wie sie im Beispielszenario von subjektiver Überwachung geliefert werden. Alle Felddaten kommen direkt von den Maschinenbedienern, die „ihre“ Anlage während des Betriebs sorgfältig beobachten. Felddatum Nr.14 ist ein Beispiel, wie über das Vorschlagswesen Aussagen zum Zustand einer Anlage abgeholt werden können.

Tabelle 12 Beispiele für Felddaten aus subjektiver Überwachung

Nr.	Beschreibung	Quellsystem	Bezug	Zeitpunkt t	Störung der Fertigung
7	Standard-Magnetplatten installieren	TPM	04	011	n
10	Maschine undicht	TPM	09	103	n
14	Kabelschlepp Y-Achse schwer zugänglich ⇒ für schnellere Reparatur einen aufklappbaren Kabelschlepp einbauen	TPM	29	102	n

Ein Bezug ist in jedem Fall eindeutig benannt. Im Fall von TPM ist der Bezug in betrieblichen Formularen, z.B. einem TPM-Formblatt, definiert. Für Verbesserungsvorschläge gilt, dass sie sich auf eine zu eliminierende Schwachstelle beziehen müssen. Daher ist ein Bezug auch hier zwingend erforderlich. Ein systematischer Fehler ist für den Bezug nicht zu erwarten.

Die Quantifizierung der Änderung unterliegt dem Werker. Entsprechend seiner Bewertung wird eine Zustandsänderung als kritisch oder akzeptabel eingestuft. Bei Verbesserungsvorschlägen ist zu beachten, dass sie die Änderung des Solls vorschlagen. Ein nicht zu vernachlässigender systematischer Fehler ist zu erwarten.

Für das Attribut Zeitpunkt gilt, dass zwischen den drei Zeitpunkten Eintritt, Erkennen und Dokumentieren eine Verzögerung eintreten wird. Im Fall einer Meldung aus einem TPM-Programm ist der Überwachungszyklus als maximaler Fehler anzusetzen. Für das Vorschlagswesen kann der Fehler nur schwer quantifiziert werden, da Vorschläge in einem kreativen, ungesteuerten Prozess entstehen. Da sich Vorschläge jedoch auf eine Änderung des Soll-Zustands beziehen, ist eine Quantifizierung dieses Fehlers vernachlässigbar.

3.5.1.3 Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem

Das von vielen Instandhaltungsabteilungen betriebene Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem (IPS) ist ein wesentlicher Lieferant für Felddaten. Jedes Mal, wenn eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt oder geplant wird, entsteht ein Instandhaltungsauftrag. Störungen, die eine sofortige Behebung erfordern, werden als Instandhaltungsauftrag dokumentiert. Auch andere Tätigkeiten, die z.B. im Rahmen von Arbeitssicherheitsprüfungen durchgeführt werden, sind als Instandhaltungsauftrag dokumentiert. Instandhaltungsaufträge sind damit eine umfassende Informationsquelle.

Tabelle 13 Beispiele für das Felddatum „Instandhaltungsauftrag“

Nr.	Beschreibung	Quellsystem	Bezug	Zeitpunkt t	Störung der Fertigung
1	Neue Kühlmittelpumpen in Betrieb nehmen	IPS	49	022	j
2	X-Achse wandert	IPS	04	032	j
3	Tisch hat Spiel	IPS	16	141	n
8	Spindel getauscht	IPS	41	131	n
11	CD-Abriechen – Berechnung falsch	IPS	07	091	n
12	Brand auf Werkstücken	IPS	48	172	n

Für Instandhaltungsaufträge ist ein Bezug immer definiert, da kein Instandhaltungsauftrag ohne eine Inventarnummer eingestellt wird. Zur weiteren Eingrenzung des Bezugs werden häufig Fehlercodes eingesetzt. Dieser Code enthält implizit eine Aussage über einen Defekt oder den Umfang der Zustandsänderung. Ein wesentliches Problem dieser Codes sind Störungsketten. In einem solchen Fall wird die Ursache einer Störung falsch diagnostiziert, lediglich ein Symptom behoben und dieses Symptom als Ursache rückgemeldet. Zeigt sich ein Fehler in unterschiedlichen Symptomen, so kann der gleiche Fehler unterschiedliche Meldungen erzeugen. Der Bezug unterliegt bei Störungsmeldungen damit einem systematischen Fehler, der nicht numerisch quantifiziert werden kann. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch gezeigt, wie dieser Fehler aufgefangen werden kann.

Mit einem Fehler ist auch das Änderungsquantum behaftet, denn in den meisten Fällen kann das Ausmaß der Änderung erst nach Auftragsabschluss quantifiziert werden. Bestimmte Indikatoren können jedoch auf das Ausmaß der Änderung hinweisen: erwartete Stillstandszeit, Störungs- und Ausschussfolgekosten sowie notwendige Ersatzteile.

Für das Attribut Zeitpunkt gilt, dass zwischen den drei Zeitpunkten Eintritt, Erkennen und Dokumentieren eine Verzögerung eintreten wird, die nur schwer quantifiziert werden kann. Diese Eigenschaft unterscheidet das Felddatum „Instandhaltungsauftrag“ von einem Felddatum aus der objektiven Überwachung: Objektive Überwachung liefert eine höhere Datenqualität.

3.5.1.4 Qualitätskontrolle - Computer Aided Quality Assurance System

Während die bislang betrachteten Informationsquellen direkt Aussagen zum Zustand der Produktionsanlage geben, führt die Qualitätskontrolle eine indirekte Überwachung der gefertigten Produkte durch. Aufgrund des relativ zur Anlagenüberwachung höheren direkten Nutzens für die Produktivität ist die Qualitätssicherung vielfach besser systematisiert als die Anlagenüberwachung. Dies sichert eine hohe Verfügbarkeit von Felddaten.

Nachteilig ist jedoch, dass die Qualitätsprüfung organisatorisch vom Fertigungsprozess abgesetzt durchgeführt wird. Damit entstehen Felddaten nicht direkt am Ort der Zustandsveränderung. Für den systematischen Fehler der erzeugten Felddaten bedeutet dies, dass der Bezug nicht eindeutig zu identifizieren ist. In vielen Fällen kann nur ein verursachender Arbeitsplatz benannt werden. Auch das Änderungsquantum kann nur mittelbar bestimmt werden. Dabei ist ein großer systematischer Fehler zu erwarten, denn das Schließen von Produktqualität auf Anlagenzustand ist nicht ausreichend theoretisch beschrieben. Statt eines Änderungsquantums können Ausschussteile entsprechend des Berechnungsansatzes der Nettoproduktivzeit (vgl. Kapitel 2.1.1.4 - OEE) als Verlustzeit dargestellt werden. Alternativ ließen sie sich auch als Ausschusskosten angeben. Das Attribut Zeitpunkt ist aufgrund der Zeitdifferenz zwischen Entstehung und Entdeckung mit einem nicht zu quantifizierenden systematischen Fehler behaftet.

Tabelle 14 zeigt einige Beispiele für Felddaten aus der Qualitätskontrolle. Als Bezug wurde hier der letzte Bearbeitungsschritt für die fehlerhafte Werkstückfläche eingetragen.

Tabelle 14 Beispiele für Felddaten aus der Qualitätskontrolle

Nr.	Beschreibung	Quellsystem	Bezug	Zeitpunkt t	Störung der Fertigung
5	1 Stck A4568100608 / Geometriefehler Profil	QM	26	082	n
9	4 Stck. A4568100609 / Geometriefehler Profil	QM	06	143	n

3.5.2 Zusammenfassung: Vertrauensbereiche für Felddaten

Die verschiedenen Quellen stellen Felddaten zur Verfügung, die sich in Genauigkeit und Zuverlässigkeit der einzelnen Attribute unterscheiden. Diese Unsicherheit muss für hinsichtlich der Nutzbarkeit und Relevant, die den einzelnen Datenquellen beige mes- sen wird, bewertet werden (Tabelle 15). Ihrer Natur gemäß liefert die objektive Überwa- chung zuverlässige Felddaten. Allerdings erfordert diese Datenquelle den größten Auf- wand von Mensch und Maschine. Subjektive Überwachung steht der Qualität der objektiven Überwachung im wesentlichen beim Fehler des Zeitpunkts nach. Infolge der starken methodischen Unterstützung im Störungsmeldewesen und bei der Auftragsbe- arbeitung liefert auch ein IPS zuverlässige Felddaten. Felddaten, die der Datenquelle Qualitätssicherung entnommen werden, berichten mittelbar über den Anlagenzustand. Die fehlende Angabe eines Bezugs senkt zudem den Wert der Informationen aus der Qualitätssicherung. Da jedoch in der Praxis akute Qualitätsprobleme häufig durch In- standhaltungsmaßnahmen behandelt werden, haben die Rückmeldungen der Quali- tätssicherung einen Charakter ähnlich der subjektiven Überwachung. Mithilfe der vor- geschalteten Bewertung durch einen Mitarbeiter der Instandhaltung kann in vielen Fällen doch ein nutzbarer Bezug definiert werden.

Tabelle 15 Vertrauensbereiche der verschiedenen Quellen für Felddaten

	Bezug	Zeitpunkt	Änderungs- quantum
objektive Überwachung	+	+	+
subjektive Überwachung	+	-	○
Instandhaltungsplanung	+	+	-
Qualitätssicherung	○	○	○

+ → kleine Fehler vorhanden
 ○ → systematisch fehlerbehaftet
 - → Attribut nicht vorhanden

4 Einleitung von Instandhaltungsmaßnahmen

In diesem Kapitel wird erarbeitet, wie Maßnahmen auf der Basis von Felddaten eingeleitet werden können. Um notwendige Maßnahmen zu erkennen, wird zunächst untersucht, ob anhand eines einzelnen Felddatums bereits Maßnahmen eingeleitet werden können. Falls ein einzelnes Felddatum nicht ausreichend Informationen liefern kann, wird untersucht, ob sich eine Maßnahme aus mehreren Felddaten ableitet. Ist die Notwendigkeit einer Maßnahme erkannt, so wird diese anhand des in Kapitel 1.5.1, Tabelle 3, entwickelten Vorgehensmodells für Anliegen eingeleitet und steht dem Instandhaltungsmanagement zur weiteren Verfolgung zur Verfügung.

Wiederum wird die Methodenentwicklung anhand des Beispielszenarios erläutert. Für das Szenario werden die bereits im letzten Kapitel diskutierten Beispiele für Felddaten übernommen. Anhang A1 zeigt diese Daten noch einmal in der Übersicht.

4.1 Direkte Maßnahmeneinleitung

Im optimalen Fall ist eine notwendige Maßnahme direkt aus einem Felddatum offensichtlich: Ein solches Felddatum sind zum Beispiel die Störungsmeldung *Einrollgerät defekt*³¹ und *Maschine undicht*. Zum einen ist die Meldung konkret, das defekte Bauteil ist genau benannt, zum anderen wird mit der Störung ein Stillstand gemeldet. Ein Instandhaltungsauftrag kann daher sofort in Form eines Anliegens der Phase 3 vergeben werden. Eine Zielkostenermittlung für solche Aufträge kann durch eine Instandhaltungsarbeitsplanung erfolgen. Diese ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit und daher wurden unbekannte Zielkosten („?“) für die neuen Anliegen eingetragen.

³¹ Anhang A2: Felddaten Nr.13, 10

Auch das Felddatum 14 (*Kabelschlepp Y-Achse schwer zugänglich*) erfordert keine weitere Auswertung. Es handelt sich hier um einen Verbesserungsvorschlag, der unmittelbar eine Maßnahme vorschlägt. Da jedoch noch keine kostenmäßige Bewertung vorliegt, wird aus diesem Felddatum ein Anliegen in Phase 2 initiiert. Tabelle 16 listet die Umfänge der direkten Maßnahmeneinleitung für das Beispielszenario.

Tabelle 16 Durch direkte Maßnahmeneinleitung erzeugte Anliegen im Beispielszenario

	Beschreibung	Maßnahme	Phase	Zielkosten
F	Leck in KSS	Instandsetzungsauftrag gestellt	3	?
G	Einrollgerät defekt - Anlagenstillstand	Instandsetzungsauftrag gestellt	3	?
H	TPM: Kabelschlepp ändern	Konzept neuer Kabelschlepp entwickeln	2	offen

Direkte Maßnahmeneinleitung ist immer dann möglich, wenn alle entscheidungsrelevanten Informationen für Anliegensphase 3 vorliegen. Entsprechend des Vorgehensmodells (Tabelle 3) müssen für diese Phase Lösungsansätze termin- und kostenmäßig bewertet und ein Terminplan abgestimmt sein. Diese Information liefert nicht jedes Felddatum. Beispielsweise beschreibt Felddatum 12 (*Brand auf Werkstücken*) zwar eine Soll-Ist-Abweichung der Produktqualität, ein Lösungsansatz in Form eines defekten Bauteil oder eines fehlerhaften Prozessparameters wird jedoch nicht benannt. Ein Anliegen muss daher nur in Phase 1 gestartet werden.

Ob Felddaten die Kriterien für direkte Maßnahmeneinleitung erfüllen, ist über eine Betrachtung der Datenherkunft quantifizierbar. Systematisch bedingt können einige Quellen bereits die Inhalte der Phasen 1 bis 3 eines Anliegens abdecken. In Tabelle 17 ist die Eignung von Felddaten zur direkten Maßnahmenentscheidung getrennt nach Herkunftssystem bewertet. Deutlich wird, dass der optimale Fall nur mit einer objektiven Überwachung erreicht wird. Anzumerken ist, dass für diesen Fall implizit eine Diagnosekomponente im Überwachungssystem vorausgesetzt wird. Ohne diese Diagnosekomponente könnte kein Lösungsansatz benannt werden.

Im Fall der subjektiven Überwachung ist davon auszugehen, dass Lösungsansätze für ein erkanntes Problem bereits parallel zur Entdeckung entwickelt sind. Paradoxerweise kann jedoch aufgrund der subjektiven Beobachtung eine Soll-Ist-Abweichung nicht immer als messbare Größe dargestellt werden. Denn die dazu notwendige objektive Messung ist häufig nicht leistbar (z.B. Ergonomieuntersuchung) oder überflüssig (z.B. bei Störungsmeldungen).

Für Daten aus der Qualitätssicherung gilt, dass sie zwar eine Soll-Ist-Abweichung der Produktqualität genau angeben können, jedoch nur unzuverlässige Angaben zu den Lösungsmöglichkeiten geben.

Tabelle 17 Eignung der Felddaten zur direkten Maßnahmeneinleitung

Phase	Notwendiger Kenntnisstand für erfolgreichen Phasenabschluss	Herkunftssystem eines Felddatums			
		Objektive Überwachg.	Subjektive Überwachg.	IPS	Qualitätssicherung
1 Entdeckung	Soll-Ist-Abweichung	<i>j</i>	<i>(j) *</i>	<i>(n)**</i>	<i>j</i>
2 Lösungsansätze	Änderungskonzepte: fragliche Funktion(en) oder Komponente(n) bekannt	<i>j</i>	<i>j</i>	<i>j</i>	<i>n</i>
3A Umsetzung geplant	Fragliche Komponente(n) ermittelt	<i>j</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
3B Bewertung	Termine + Kosten geplant	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
4 Umsetzung	Nicht relevant für Instandhaltungsanalyse				
5 Dokumentation					

j → Phase kann abgeschlossen werden.

n → Aussagekräftige Daten fehlen, Phase kann nicht abgeschlossen werden.

*(j)** → Infolge der subjektiven Überwachung ist eine Soll-Ist-Abweichung nur selten quantifizierbar.

*(n)*** → Diese Funktion ist typischerweise nicht Teil der Instandhaltungsplanung.

Direkte Maßnahmeneinleitung lässt sich nicht mehr anwenden, wenn mehr als ein Felddatum für die Begründung einer Maßnahme notwendig ist. Zeitbezogene Merkmale wie Kosten oder Verfügbarkeit erfordern zum Beispiel die Auswertung mehrerer Felddaten. Die Auswertung von Felddatengruppen und anschließendes Schlussfolgern, die indirekte Maßnahmeneinleitung, werden im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Indirekte Maßnahmeneinleitung

Ist für ein Felddatum auf den ersten Blick keine Soll-Ist-Abweichung erkennbar, so muss geprüft werden, ob eine Maßnahme indirekt eingeleitet werden muss. Dieser Fall tritt immer dann ein, wenn ein zeitbezogenes Merkmal wie die Anlageneffizienz die Be-

trachtung mehrerer Felddaten erfordert oder der Bezug eines Felddatums kein Merkmal ist.

Ein Grund für diese Situation ist, dass Bezug und verändertes Zustandsmerkmal nicht zwingend identisch sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Erfasser den Bezug auswählen und deklarieren muss. Diese auf den ersten Blick einfache Auswahl unterliegt einer Variabilität. Sie ist am Beispiel von Störungsmeldungen deutlich zu erkennen: Eine Störung kann entweder als Defekt eines Bauteils bzw. einer Baugruppe oder als Ausfall einer Funktion formuliert sein. Wie der Bezug spezifiziert wird, hängt davon ab, ob der Erfasser die Produktionsanlage funktions- oder komponentenorientiert in Teilsysteme gliederte. Beide Gliederungen sind zulässig, führen jedoch zu unterschiedlichen Gliederungselementen (Abbildung 32).

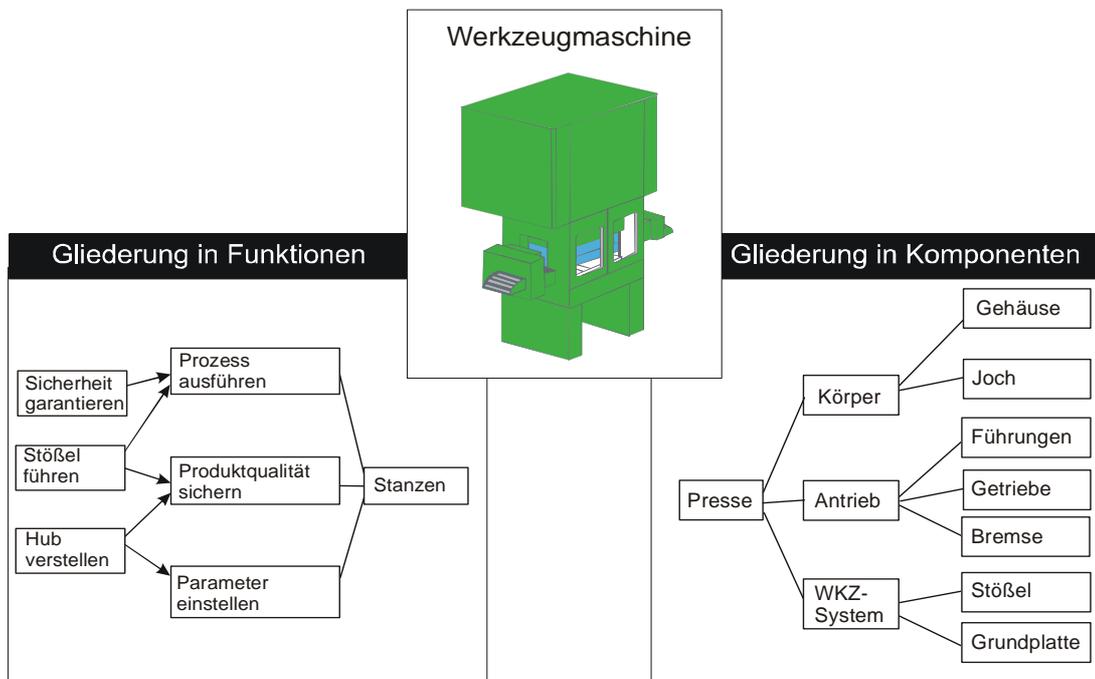


Abbildung 32 Funktions- oder komponentenorientierte Gliederung am Beispiel einer Stanze

Jedes Felddatum hat einen *Aspekt*, der benennt, unter welcher Gliederung es erfasst wurde. Anhand des Aspekts können Felddaten in Komponenteninformation oder Funktionsinformation unterschieden werden (Definition 12 und Definition 13).

Definition 12 Komponenteninformation

Eine Komponenteninformation benennt die Zustandsänderung einer Komponente (einer Baugruppe oder eines Bauteils) einer Produktionsanlage.

Definition 13 Funktionsinformation

Eine Funktionsinformation benennt die Zustandsänderung einer Funktion einer Produktionsanlage.

Die Wahl des Aspekts wird vom Informationsstand und der Qualifikation des Erfassers geprägt. Störungen werden z.B. von niedrig qualifizierten Arbeitern häufig anhand einer ausgefallenen Teilfunktion beschrieben, da sie die unterliegenden Ursachen und Komponenten nicht ergründen können. Die Meldung einer vermeintlichen Störungsursache erfolgt hingegen über die Angabe eines Bauteils. Solche Meldungen haben z.B. die Form „Fehler in Komponente X“. Ob dies die tatsächliche Ursache ist, kann zum Meldungszeitpunkt nicht bewertet werden (Tabelle 18).

Tabelle 18 Beispiele für typische Störungsmeldungen

	Beschreibung	Rückmeldecode ³²	Aspekt
16	Pumpe, Frequenzregler u. Kämmerventil defekt	57 (Hydraulik)	Komponente
17	Druck fällt ständig ab	57 (Hydraulik)	Funktion
18	Keine Negativspannung	28 (Elektrik)	Komponente

Um die Relevanz dieser Unterscheidung festzustellen, wurde eine nachträgliche Analyse einer realen Störungsdatei vorgenommen. Jede Störungsmeldung wurde je nach Art des beschreibenden Störungstextes³³ als funktionsorientiert oder komponentenorientiert markiert. Die Betrachtung von etwa 2500 Rückmeldungen aus einer Werkstattfertigung mit 102 Werkzeugmaschinen ergab, dass bei etwa 75% ein Bauteil oder eine Baugruppe, bei 25% eine Maschinenfunktion als Bezug angegeben wurde. Auffällig ist, dass der Aspekt einer Meldung bei der Eingabe des Rückmeldecodes nicht berücksichtigt wurde. In Tabelle 18 weisen die Zeilen 16 und 17 bei unterschiedlichem Aspekt denselben

³² Vgl. auch Anhang A4

³³ Die Störungsmeldungen wurden als Freitext abgegeben.

Rückmeldecode auf. Obwohl Rückmeldecodes generell systematisch definiert werden, blieb dieser Aspekt von Rückmeldungen bislang unberücksichtigt³⁴. Durch organisatorische Richtlinien kann dieses Problem nicht gelöst werden, da ein massiver Mehraufwand in der Datenerfassung entstände.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz einer funktionsorientierten Darstellung des Soll-Zustandes kann zunächst also nur die 25% funktionsorientierten Felddaten verarbeiten. Um die restlichen 75% der Daten verwenden zu können, ist eine Methode notwendig, die einen Zusammenhang zwischen den Aspekten herstellt. Eine solche Methode, ihre theoretischen Grundlagen und ihre Anwendung werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

4.2.1 Zusammenhang von Komponenten- und Funktionsinformation

Um eine Zustandsbewertung unter Nutzung aller verfügbaren Felddaten durchzuführen, müssen Zusammenhänge zwischen Komponenten und Funktionen einer Anlage gefunden werden. Wenn anhand dieser Zusammenhänge bekannt ist, welchen Beitrag eine Komponente zur Erfüllung einer Funktion leistet, können die vorhandenen Komponenteninformationen in die funktionale Darstellung transformiert werden.

Die methodischen Grundlagen einer solchen Transformation wurden im Rahmen des Änderungsmanagements entwickelt. Die als *Propagation* bezeichnete Technik wurde entwickelt, um alle von einer Konstruktionsänderung betroffenen Komponenten zu ermitteln [Ritz99]. Propagation ist in der Grundform eine systematische Betrachtung der geometrischen Zusammenhänge zwischen Bauteilen, z.B. eine Nachbarschaftsbetrachtung. In der Instandhaltung hingegen wird Propagation eingesetzt, um diejenigen Anforderungsfunktionen zu ermitteln, die von einer einzelnen Zustandsänderung betroffen sind. Für die Instandhaltung wird der Begriff Propagation definiert als:

Definition 14 Propagation

Ermittlung der Anforderungsfunktion(en), deren Zustandsmerkmale durch ein Felddatum beeinflusst werden.

Abbildung 33 illustriert das Prinzip der Propagation anhand der Störungsmeldung „*Beladeklappen schließt nicht*“, die auf die Komponente „*Beladeklappen/Gehäuse*“ bezogen ist. Das Gehäuse ist jedoch eine relevante Komponente der Funktion „*(Arbeits-) Sicherheit garantieren*“, welche wiederum für den Prozessanlauf relevant ist. Die nicht schlie-

³⁴ [Ebner96] schlägt die Verwendung von Wörterbüchern vor, die jedoch ebenfalls ohne Berücksichtigung von Aspekten gebildet werden.

ßende Beladeklapppe ist damit relevant für die Funktion „*Prozess ausführen*“. Andere Funktionen bleiben unbeeinflusst.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass für die Instandhaltung nicht-geometrische Zusammenhänge relevant sind. Propagation in der Instandhaltung erfolgt nicht sortenrein nur von einem Bauteil auf ein anderes, sondern auch von Komponenten hin zu Funktionen. Im Gegensatz zu geometrischen Beziehungen lassen sich diese Zusammenhänge nicht aus einem Geometriemodell ableiten. In diesem Kapitel wird daher ein Anlagenmodell entwickelt, das die Propagation für die Instandhaltung unterstützt.

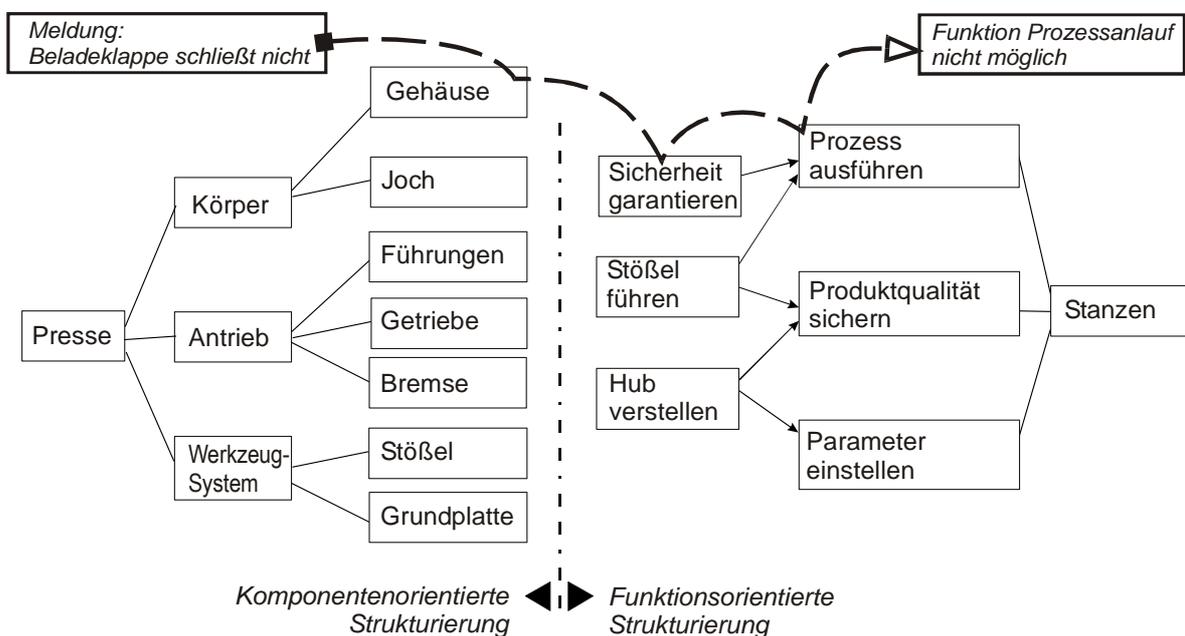


Abbildung 33 Ansatz „*Propagation*“ zur vereinheitlichten Verarbeitung von Felddaten, vgl. auch Abb. 32

4.2.2 Anlagengraphen

In diesem Kapitel werden die methodischen Instrumente für die Propagation entwickelt. Wesentliches Instrument ist der Anlagengraph, der die Zusammenhänge von Komponenten und Funktionen in Form eines Graphen dokumentiert. Zunächst werden dazu die Elemente eines Anlagengraphens definiert und danach seine strukturellen Eigenschaften erörtert. Illustriert wird dieses Verfahren wiederum mit einer konkreten Maschine aus dem Beispielszenario.

4.2.2.1 Grundlegende Definitionen

Das elementare Strukturobjekt des Anlagengraphens ist das *Dekompositionsobjekt* (Definition 15). Ein Dekompositionsobjekt umfasst die zustandsrelevanten Merkmale genau einer Funktion oder Komponente. Ob ein Dekompositionsobjekt Funktion oder Komponente darstellt, ist dabei nebensächlich. Wesentlich ist, dass jedes Merkmal eines Arbeitsplatzes immer genau einem Dekompositionsobjekt zugeordnet ist.

Definition 15 **Dekompositionsobjekt**

Ein Dekompositionsobjekt ist ein eindeutiges Teilsystem eines Arbeitsplatzes S , das bei der Zerlegung des Fertigungssystems unter einem bestimmten Aspekt entsteht.

Ein Dekompositionsobjekt d ist beschrieben durch eine echte Teilmenge M der Merkmalsmenge von S .

Die einem Dekompositionsobjekt zugeordneten Merkmale können in ihrer Ausprägung entweder *objekteigen* und unveränderlich sein, wie z.B. die maximale Drehzahl eines Motors, oder sie können von Merkmalen anderer Dekompositionsobjekte *abhängig* sein. Während die Ausprägung eines unveränderlichen Merkmals im gesamten System konstant bleibt, sind die Ausprägungen abhängiger Merkmale rechnerisch miteinander verknüpft. Ein typisches abhängiges Merkmal ist die Ausfallrate λ eines zusammengesetzten Systems, die aus den Ausfallraten λ_i der Teilsysteme $1-n$ bestimmt werden kann zu $\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$.

Bestehen solche Verknüpfungen zwischen abhängigen Merkmalen, ist eine Propagation von Felddaten notwendig, um die aktuelle Ausprägung zu berechnen. Diese Verknüpfungen zwischen Zustandsmerkmalen werden durch *Propagationsassoziationen* dargestellt. Diese Modellierung einer Produktionsanlage mit Dekompositionsobjekten und Propagationsassoziationen hat alle Eigenschaften eines gerichteten Graphen (Definition 16). Dekompositionsobjekte entsprechen den Knoten des Graphen, Propagationsassoziationen den Kanten.

Definition 16 **Anlagengraph**

Ein Anlagengraph besteht aus einer Menge von Dekompositionsobjekten \mathbf{D} und einer auf \mathbf{D} definierten Abbildung \mathbf{P} , die jedem $\mathbf{d} \in \mathbf{D}$ ein geordnetes Paar von Elementen $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2 \in \mathbf{D}$ zuordnet.

Um einen Anlagengraphen für einen Arbeitsplatz aufzubauen, muss die Merkmalsmenge des Arbeitsplatzes sinnvoll in Teilmengen untergliedert werden. Jede Teilmenge repräsentiert genau ein Dekompositionsobjekt. Bestehende funktionale Beziehungen zwi-

schen diesen Dekompositionsobjekten werden durch Propagationsassoziationen dargestellt.

4.2.2.2 Anlagengraph für das Beispielszenario

Für den Aufbau eines Anlagengraphen müssen zunächst Informationen zu Funktionen, Komponenten und Merkmalen einer Anlage zusammengetragen werden. Im einzelnen sind dies:

Liste der nutzerrelevanten Merkmale und Funktionen

Alle Merkmale, die in der Anforderungstabelle definiert sind, müssen auch im Anlagengraphen enthalten sein. Für das Beispielszenario ist diese Liste in Tabelle 9 dargestellt. Diese Tabelle zeigt sowohl die Funktionen als auch deren Merkmale. Zusätzlich wird die Position „Bediener“ hinzugefügt, der Funktionen manuell erfüllen kann. Jede Position wird als Dekompositionsobjekt betrachtet.

Aufstellung der Komponenten

Diese Tabelle gibt eine Übersicht über die verfügbaren Komponenten und ist im allgemeinen in Form einer Inventarliste vorhanden. Aus dieser Inventarliste wurden alle spezifischen Maschinen und Vorrichtungen entnommen, die dem Arbeitsplatz bereits zugeordnet sind. Dieser Schritt setzt eine korrekte Inventarliste voraus, in der Praxis hat sich eine Sichtkontrolle als hilfreich erwiesen.

Auch hier wird jede Position als Dekompositionsobjekt betrachtet.

Strukturinformationen

Häufig ist eine Betrachtung des „Innenlebens“ der identifizierten Dekompositionsobjekte notwendig, um einen eindeutigen Anlagengraphen aufbauen zu können. Strukturinformation kann aus allgemeingültigen Strukturprinzipien gewonnen werden. Ein Beispiel für solche Prinzipien zeigt Abbildung 34. Die auf diese Weise identifizierten und strukturierten Komponenten des Beispielarbeitsplatzes zeigt Tabelle 19. Falls ausreichende Informationen von Seiten des Maschinenherstellers vorliegen, können die Konstruktionskomponenten auch aus einer Strukturstückliste abgeleitet werden.

Table 19 Komponententabelle des Beispielarbeitsplatzes;
 Superkomponenten wurden aus allgemeinen Strukturprinzipien abgeleitet.

Gerät	Komponenten	
	Superkomponente	Komponente
Planschleifmaschine	Abrichtgerät	Profilierrolle; Antrieb; Führungen
	Maschinenbett	Hydromotor; Türen und Klappen; Dichtungen; Hydroleitungen; Ventile; Ölkühler
	Längsvorschubschlitten	Führungen; Antrieb; Anschläge; Tisch
	Quervorschubschlitten	Führungen; Antrieb; Anschläge
	Schleifspindelstockschlitten	Hauptspindel; Spindelmotor; Führungen; Antrieb; Anschläge
	Steuerung	Bedientafel; Bedienelemente; Anzeigeelemente; Kabel; Si- cherungen; Steuergeräte; Leis- tungssteuerung; Informations- steuerung
Werkerselbstprüfungsgerät		Mess- und Spannvorrichtung; Protokolliergerät
Spanfilteranlage		Filter; Leitungen; Dichtungen; Pumpe; Trennanlage; Spankas- ten
Spannmittel		Magnetspannplatten
Be- und Entladeeinrichtung		- derzeit keine Komponenten -
Bediener		1 Mitarbeiter

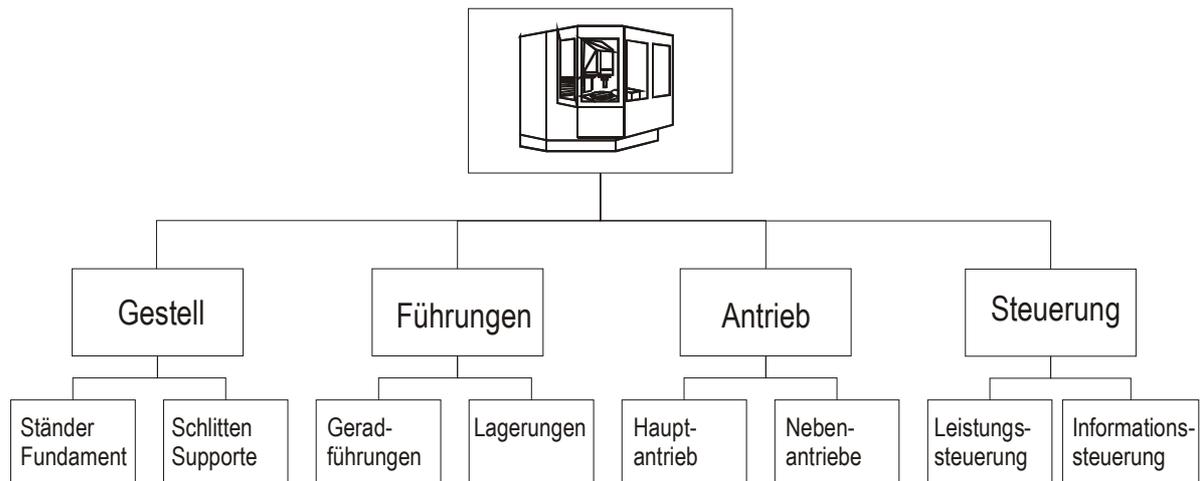


Abbildung 34 Generische Elemente einer Werkzeugmaschine [Tönshoff95]

Diese drei Listen sind der Ausgangspunkt für den Aufbau eines Anlagengraphens. Der Graph selbst wird aufgebaut, indem die strukturellen Zusammenhänge zwischen den nutzer-relevanten Funktionen und den identifizierten Komponenten erschlossen und dokumentiert werden. Der fertige Anlagengraph ist in Anhang A4 dargestellt.

Deutlich wird, dass die meisten der Anforderungsfunktionen durch die Planschleifmaschine abgedeckt werden. Die Aufgaben Beladen und Prüfen erfordern jedoch periphere Geräte. Die Funktion des Kühlschmierens wird nur zum Teil direkt am physikalischen Arbeitsplatz erfüllt. Wesentliche Aufgaben werden von der zentralen Kühlschmierstoffversorgung abgedeckt. Da deren Komponenten relevant für die Funktionen des Arbeitsplatzes sind, werden sie in den Anlagengraphen aufgenommen.

Um mit den Anlagengraphen Propagation betreiben zu können, muss vorab geklärt werden, wie ein Anlagengraph methodisch richtig aufzubauen ist und welche Randbedingungen dabei zu beachten sind. Weiterhin ist zu klären, welche Eigenschaften eines Anlagengraphen für die Zustandsverfolgung nützlich sind. Diese Themen werden in den folgenden zwei Kapiteln behandelt.

4.2.3 Systematik zum propagationsgerechten Aufbau von Anlagengraphen

Beim Aufbau des Anlagengraphen wird auf vorhandenes Wissen zurückgegriffen: Technische Komponenten können u.a. aus Stücklisten abgeleitet werden, für die Anforderungstabelle wurde die methodische Entwicklung bereits beschrieben. Ein systematisches Vorgehen für die Bestimmung der Propagationsassoziation \mathcal{P} fehlt jedoch bislang noch. Besonders zu berücksichtigen ist dabei die Notwendigkeit, dass

Felddaten entlang der Propagationsassoziation verarbeitet werden und dass die richtige Ermittlung eines Zustands damit von ihrer Korrektheit abhängt.

Der Aufbau eines Anlagengraphen beginnt mit der Zusammenstellung der Anforderungsfunktionen und der Merkmalsmenge (vgl. Kapitel 3). Nun müssen für jede Anforderungsfunktion diejenigen Komponenten identifiziert werden, von denen die Merkmale der Funktion abhängig sind. Zur Identifikation der Abhängigkeiten lässt sich ein Vorgehen analog einer FMEA³⁵ einsetzen. Entsprechend der formalisierten Vorgehensweise einer FMEA muss nun für jede Komponente bestimmt werden, ob eine Anforderungsfunktion existiert, die ein von den betrachteten Komponenten abhängiges Merkmal hat. Dabei ist zu beachten, dass eine Komponente Träger eines objekteigenen Merkmals sein kann oder ein abhängiges Merkmal beeinflusst. Unabhängig von der Art des Merkmals wird eine identifizierte Abhängigkeit durch eine Propagationsassoziation dokumentiert. Der Prozess ist abgeschlossen, wenn für jede Funktion diese Untersuchung durchgeführt wurde.

Es ist bei diesem Prozess selten möglich, jede Komponente direkt einer Anforderungsfunktion zuzuordnen. Vielmehr werden Komponenten zu Baugruppen zusammengefasst oder Funktionen in Unterfunktionen geteilt, um die Komplexität der Aufgabe zu reduzieren. Zwingend notwendig ist diese tiefere Gliederung immer dann, wenn einzelne Komponenten an mehreren Funktionen beteiligt sind. Im Szenario tritt dieser Fall an mehreren Stellen auf. So kann für die Anforderungsfunktion „Kühlschmierung“ keiner der drei Teilfunktionen „Fördern, Aufbereiten, Späne abführen“ das Anforderungsmerkmal „KSS-Durchsatz 500l/h“ eindeutig zugeordnet werden. Daher wird eine Baugruppe „Leitungssystem“ und eine Funktion „Späne von KSS trennen“ eingeführt (Abbildung 35). Nun können die Anforderungsmerkmale entsprechend verteilt werden: Die Trennanlage muss 25mm³/min abscheiden können, Leitungen und Pumpe müssen 500l/h fördern können. Die neu eingeführten Elemente unterscheiden sich formal nicht von den Dekompositionsobjekten der Anforderungsanalyse und werden daher ebenfalls durch Dekompositionsobjekte dargestellt.

³⁵ Der erste Schritt einer FMEA kann für einen Anlagengraphen entfallen, da die Hauptfunktionen und deren Merkmale bereits in der Anforderungsanalyse bestimmt wurden.

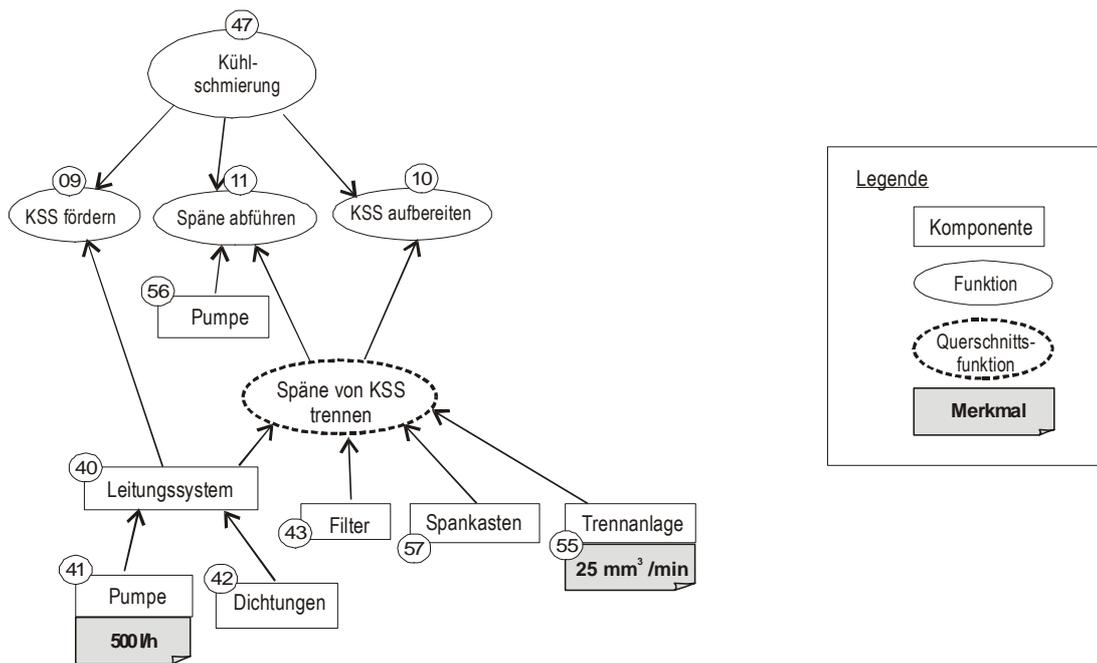


Abbildung 35 Darstellung der Anforderungsfunktion Kühlschmierung durch einen Anlagengraphen (Ausschnitt aus Anhang A4)

Durch die Einführung von zwischengeordneten Dekompositionsobjekten steigt die Anzahl der möglichen Formen der Propagationsassoziationen zwischen Dekompositionsobjekten. Abbildung 36 zeigt die möglichen Formen³⁶. Jedoch sind nicht alle Kombinationen in der Modellierung zulässig, sondern nur diejenigen, die eine technisch sinnvolle Beeinflussung von Zustandsmerkmalen ermöglichen. Eine Komponente kann z.B. eine andere Komponente oder eine Funktion in ihren Zustandsmerkmalen beeinflussen (Abbildung 36, Form 1, 2, 3). Dabei können mehrere Komponenten zu einem Gesamtzustand beitragen (Form 5, 6, 7, 8). Die Propagation einer Funktion auf eine Komponente (Form 4, 11) ist nicht zulässig, da dann ein Komponentenausfall die Folge einer Funktionsstörung wäre. Die Funktion würde aktiv eine Komponente zerstören. Weiterhin kann ausgeschlossen werden, dass ein Bauteil Bestandteil mehrerer Baugruppen (Form 9, 12) ist.

Eine eingehende Betrachtung ist für die Formen 10 und 13 (Diversifikation) notwendig. Diversifikation entsteht, wenn eine Komponente bzw. Funktion zu mehr als einer übergeordneten Funktion beiträgt. Für die Bestimmung von Zustandsmerkmalen einer Anforderungsfunktion bedeutet dies, dass nicht abzusichern ist, dass der Zustandswert einer Hauptfunktion k_A unabhängig vom Zustandswert einer anderen Hauptfunktionen k_B

³⁶ Es reicht aus, eine drei-elementige Agglomeration und Diversifikation zu betrachten, da aus diesen Bausteinen höherelementige Propagationen aufgebaut werden können.

ist (Abbildung 37). Dekompositionsobjekte mit diversifizierender Eigenschaft sollen *Querschnittsfunktion* heißen (Knoten *b*, Abbildung 37)

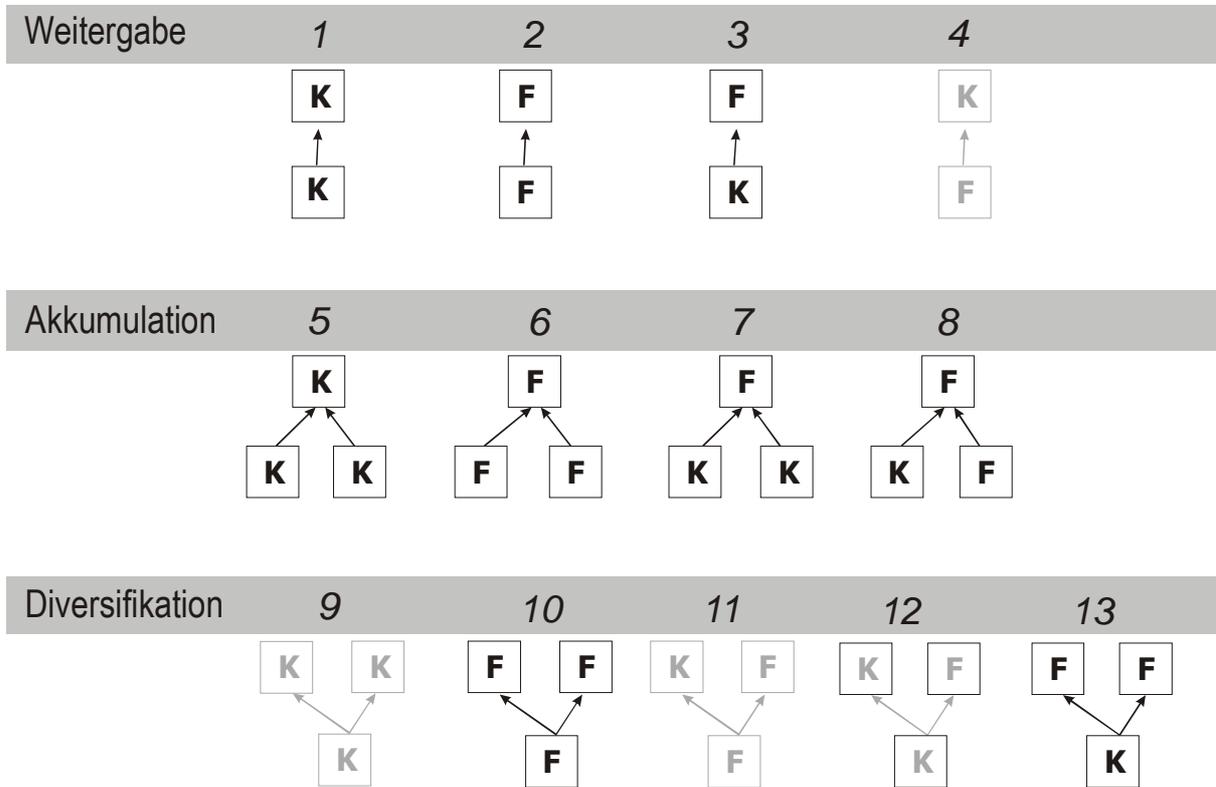


Abbildung 36 Mögliche Formen für Propagationsassoziationen (F: Funktion; K: Komponente)

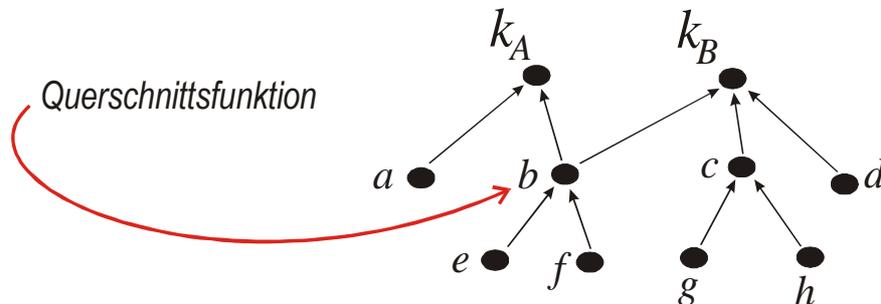


Abbildung 37 Knoten *b* propagiert auf k_A und k_B , somit sind die Zustände $Z(k_A)$ und $Z(k_B)$ nicht mehr unabhängig.

Querschnittsfunktionen können durch eine systematische Untersuchung der mathematischen Eigenschaften des Anlagengraphen erkannt werden. Hierzu wird für jede Anforderungsfunktion der zugeordnete Spannbaum³⁷ S berechnet [Sedgewick92]. Dieser Spannbaum benennt alle Dekompositionsobjekte, die auf eine Anforderungsfunktion wirken. Abbildung 38 zeigt einen Spannbaum, der darstellt, dass die Knoten $b...h$ auf den Knoten k_B propagieren. Eine weitere Berechnung des Spannbaums für k_A zeigt, dass der Knoten b und seine Subknoten e, f eine Querschnittsfunktion darstellen.

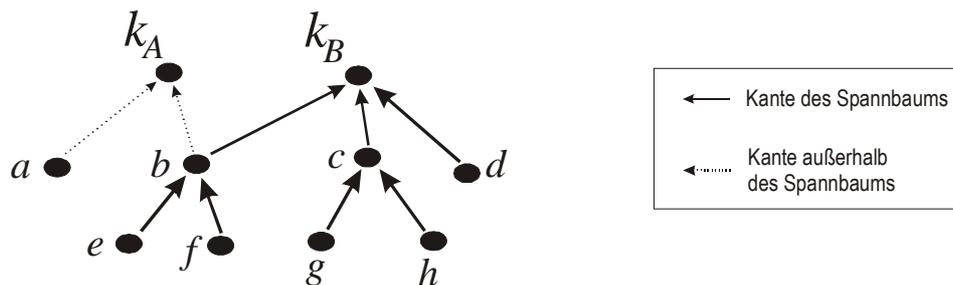


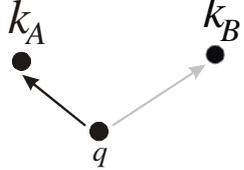
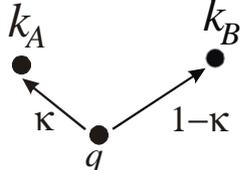
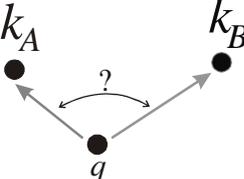
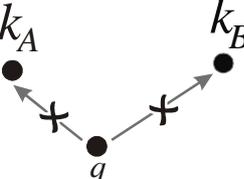
Abbildung 38 Spannbaum für Knoten k_B unter Berücksichtigung gerichteter Kanten

Der Anlagengraph dokumentiert, dass bei einer Zustandsänderung einer Querschnittsfunktion mehrere Anforderungsfunktionen direkt betroffen sind. Ein Felddatum wird daher auf alle Anforderungsfunktionen verteilt. Damit würde aber die quantitative Zustandsänderung vervielfacht. Entstehen z.B. Instandhaltungskosten m an der Querschnittsfunktion b oder einer ihrer Subfunktionen e oder f , so müssen die Funktionen k_A und k_B diese Kosten tragen. Würde uneingeschränkt propagiert, so verdoppelten sich die Instandhaltungskosten. Daher ist eine Festlegung notwendig, wie an Querschnittsfunktionen die vorhandenen Propagationsassoziationen angewendet werden sollen. Ein systematisches Verfahren für diese Aufgabe, den Propagationpfad eindeutig und nicht-situativ zu ermitteln, ist bislang nicht bekannt.

Prinzipiell stehen für die Wahl eines Propagationpfades vier Alternativen zur Wahl (Tabelle 20). In den Alternativen 1 und 2 muss jede Diversifikation in einem Anlagengraphen durch einen Experten bewertet werden, der über den Pfad bzw. die Aufteilung bestimmt und dies im Anlagengraph dokumentiert. Hinsichtlich der Menge der zu erwartenden Diversifikationen für ein vollständiges Produktionssystem sind diese Alternativen als aufwändig in Erstellung und Pflege zu bewerten. In Alternative 3 wird eine situative Bewertung anhand des zu propagierenden Felddatums vorgenommen. Diese Auswertung erfordert Expertenwissen und ist daher nicht algorithmisch darstellbar.

³⁷ Ein Spannbaum ist ein Teilgraph, der alle Knoten enthält, jedoch nur so viele von den Kanten, dass er einen Baum bildet.

Tabelle 20 Alternativen zur Wahl eines Propagationspfades

1	Vorgabe eines Pfades (z.B. aus der Expertise von Entwicklern oder Instandhaltern heraus).	
2	Aufteilung des Zustandsdatums auf alle Zweige mit einem fixen Schlüssel κ . Festlegung von κ z.B. durch Experten.	
3	Situative Festlegung des Propagationspfades anhand des vorliegenden Zustandsdatums (entspricht einem variablen Schlüssel in Fall 2).	
4	Betrachtung der Querschnittsfunktionen als eigenständige Anforderungsfunktionen. Propagation hält an.	

Für die Anwendung in der Instandhaltung wird vorgeschlagen, Querschnittsfunktionen als eigenständige Anforderungsfunktionen zu betrachten (Alternative 4). Sie haben damit eine eigenständige zu erfüllende Merkmalsmenge. Diese Merkmalsmenge muss jedoch so definiert werden, dass sie nicht im Widerspruch zu einer anderen Anforderungsfunktion steht. Damit stehen die Merkmale einer Querschnittsfunktion weiterhin in logischem Zusammenhang mit den Anforderungsfunktionen, eine Propagation findet jedoch nicht statt.

Ein Anlagengraph ist eine geschlossene Darstellung aller vorhandenen und erforderlichen Funktionen und Komponenten eines Arbeitsplatzes. Jedes dieser Dekompositionsobjekte ist über eine Positionsnummer eindeutig identifizierbar. Diese Positionsnummer lässt sich auch als Rückmeldecode nutzen, so dass ein Bezug für Felddaten definiert wird.

Der Anlagengraph beschreibt damit

- alle in Nutzung befindlichen Komponenten eines Arbeitsplatzes
- die funktionalen Zusammenhänge der Komponenten
- die Wirkung der Komponenten auf die Anforderungsfunktionen
- die Querschnittsfunktionen, die einzeln betrachtet werden müssen

Um den Aufbau von Anlagengraphen für die Praxis zu erleichtern, ist zu hinterfragen, ob wirklich alle Komponenten eines Arbeitsplatzes durch ein eigenes Dekompositionsobjekt im Graphen dargestellt werden müssen. Dieser Detaillierungsgrad ist für die Anwendung in der Praxis zu hoch, da nur diejenigen Dekompositionsobjekte benötigt werden, für die zustandsrelevante Felddaten vorliegen können. Wird weiter detailliert, als Felddaten vorliegen, so entsteht kein zusätzlicher Nutzen. Um den Anlagengraphen hinsichtlich seiner Größe zu optimieren, können daher alle Dekompositionsobjekte entfernt werden, auf die sich keine eigenständigen Felddaten beziehen. Dabei müssen folgende Bedingungen beachtet werden:

- (1) Für jeden Bezug, der in Felddaten genannt werden (kann), muss ein Dekompositionsobjekt vorhanden sein.
- (2) Querschnittsfunktionen müssen erhalten bleiben.

Bedingung 1 erlaubt es, auf die Detaillierung von Baugruppen in einzelne Komponenten zu verzichten. So werden Komponenten wie Leitungssätze, elektrische Steuergeräte oder Pumpen von der Instandhaltung als Einheit angesehen. Eine formale Abgrenzung für solche Einheiten lässt sich nicht angeben, da sie durch externe Rahmenbedingungen bestimmt werden. Typische Rahmenbedingungen sind z.B. die verfügbaren Ersatzteile oder die Möglichkeiten zur Eigenreparatur in einer Instandhaltung.

Bedingung 2 erfordert, dass Funktionen weiter detailliert werden müssen, wenn in ihnen eine Querschnittsfunktion verborgen ist. Die Detaillierung muss dabei solange fortgesetzt werden, bis die Komponenten, welche die Querschnittsfunktion realisieren, eindeutig identifiziert sind. Danach kann die Querschnittsfunktion als solche markiert und ihre Merkmalsmenge festgelegt werden. Ihre hierarchische Position im Anlagengraphen bleibt jedoch unverändert. Würde jede Querschnittsfunktion auf die Ebene einer Anforderungsfunktion gehoben, so würde nicht mehr gewährleistet sein, dass die funktionalen Zusammenhänge der modellierten Anlage korrekt dargestellt sind.

4.2.4 Konfigurationsänderungen im Anlagengraph

Der Anlagengraph ist auf den ersten Blick eine Strukturdarstellung eines Systems. Er ermöglicht jedoch eine Vereinheitlichung der Begriffe *Zustand* und *Konfiguration*. Tritt eine Änderung des Zustands (z.B. durch Degradation) oder der Konfiguration (z.B. durch Umbau) ein, so wird sich diese Änderung im Anlagengraph niederschlagen.

Um zu zeigen, dass das Konstrukt des Anlagengraphen die Begriffe Konfiguration und Zustand vereinheitlicht, wird für ein System dessen Anlagengraph G_{T_0} zum Zeitpunkt T_0 mit dessen Vorgänger G_{T-1} zum Zeitpunkt T_{-1} verglichen und die Differenz bewertet.

Zunächst ist dazu eine Rechenvorschrift notwendig, die die Differenz von G_{T_0} und G_{T-1} bestimmt. Die Graphentheorie definiert zwei Graphen A, B als identisch, wenn zu jedem Element $a \in A$ ein Element $b \in B$ existiert, für das gilt $a=b$. Im Fall von Anlagengraphen muss dazu die Identität von Dekompositionsobjekten gezeigt werden. Zwei Dekompositionsobjekte E, F sind identisch wenn sie in allen Eigenschaften gleich sind. Da ein Dekompositionsobjekt durch eine Merkmalsmenge M und deren Ausprägungen A beschrieben wird, tritt beim Vergleich der Dekompositionsobjekte E, F einer von drei verschiedenen Fällen ein:

- (1) Sind Merkmale und deren Ausprägungen identisch,

$$M_E \equiv M_F \quad \text{und} \quad A_E = A_F$$

so sind die Dekompositionsobjekte E, F identisch.

- (2) Sind nur die Merkmale identisch,

$$M_E \equiv M_F \quad \text{und} \quad A_E \neq A_F$$

so sind die Dekompositionsobjekte E, F aus der gleichen Klasse³⁸.

- (3) Sind die Merkmale nicht identisch,

$$M_E \neq M_F$$

so sind die Dekompositionsobjekte E, F unterschiedlich.

Diese Methode lässt sich auch auf Propagationsassoziationen anwenden, die somit ebenfalls als Dekompositionsobjekte angesehen werden. Eine Propagationsassoziation hat grundsätzlich die zwei Merkmale „Propagation von“ und „Propagation auf“. Die Ausprägung für jedes dieser Merkmale ist jeweils ein anderes Dekompositionsobjekt³⁹. Da

³⁸ Beide Dekompositionsobjekte beschreiben dann zwei Instanzen eines Systems, z.B. zwei Motoren mit unterschiedlicher Betriebsdauer.

³⁹ Exakt ist die Ausprägung eine Referenz auf ein Dekompositionsobjekt.

Propagationsassoziationen prinzipiell aus der gleichen Klasse sind (Fall 2), können beim Vergleich von Propagationsassoziationen nur die Fälle 1 und 3 eintreten.

Über die Vergleichsmethode lassen sich nun die geänderten Dekompositionsobjekte identifizieren. Ob es sich bei einer Änderung um eine Zustands- oder Konfigurationsänderung handelt, lässt sich aus dem betroffenen Dekompositionsobjekt ableiten. Abbildung 39 klassifiziert die möglichen Änderungen anhand einer Teilmengenbildung innerhalb des Anlagengraphen.

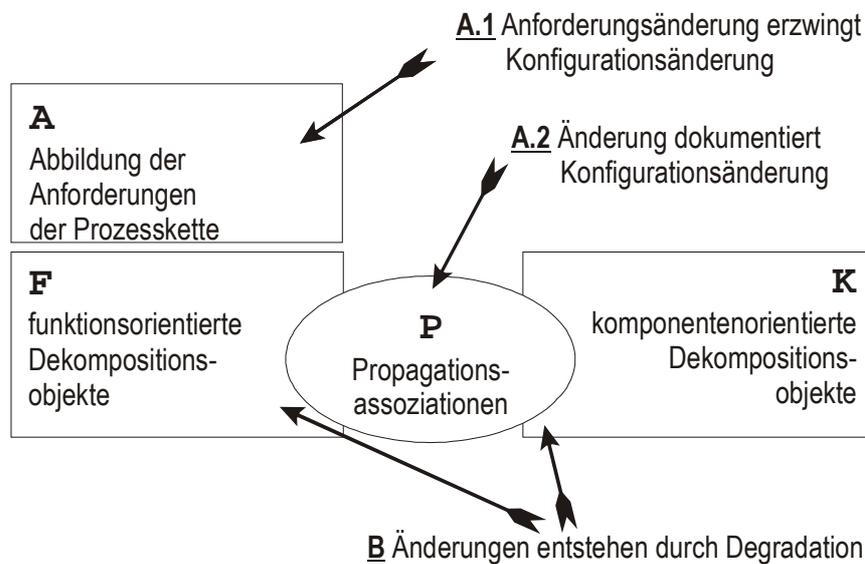


Abbildung 39 Typisierung von Änderungen anhand des Anlagengraphen

Jedes Dekompositionsobjekt ist dabei eindeutig einer Teilmenge zugeordnet: **F** umfasst alle funktionsorientierten Dekompositionsobjekte, **K** die komponentenorientierten. **P** enthält die Propagationsassoziationen. **A** bildet ausschließlich Soll-Merkmale ab. Die Menge **A** bildet die Soll-Merkmale konform zum Modell der Merkmalsmenge einer Fertigungskette ab. Jedes Dekompositionsobjekt aus **A** stellt einen Arbeitsplatz einer Fertigungskette dar.

Änderungen des Typs A können eine strukturelle Modifikation des Anlagengraphen ergeben. Eine solche Änderung ist zum Beispiel eine Aufrüstungsmaßnahme infolge einer neu definierten Anforderungsfunktion. A.1-Änderungen werden aktiv durch den Anlagenbetreiber vorgenommen, der so neue Anforderungen an einen Arbeitsplatz definiert. A.1-Änderungen dokumentieren somit die Entwicklung des Soll-Zustands.

A.2-Änderungen können nur durch aktives Eingreifen in die Funktionsstruktur entstehen. Werden neue Komponenten oder Funktionen hinzugefügt, so sind auch neue Propaga-

tionsassoziationen notwendig. A.2-Änderungen treten daher im allgemeinen als Folge einer Maßnahme ein. Das Ergebnis eine Änderung des Typs A soll als *Variante* bezeichnet werden (Definition 17).

Definition 17 Variante

Eine Variante V einer Konfiguration C unterscheidet sich von C in Elementen der Mengen \mathbf{A} oder \mathbf{P} .

Typ B Änderungen des Anlagengraphen ändern die strukturellen Eigenschaften der beschriebenen Anlage nicht. Diese Änderungen werden als *Variation* bezeichnet (Definition 18). Das Erkennen von Variationen ist im Konfigurationsmanagement der Produktentwicklung von untergeordneter Bedeutung, denn Variationen werden hier fortwährend erzeugt. Für die Instandhaltung sind sie dennoch von großer Bedeutung, da sie Zustandsänderungen anzeigen, die unerwünscht sind und eine Reaktion erfordern.

Definition 18 Variation

Eine Variation W einer Konfiguration C unterscheidet sich von C in Elementen der Mengen \mathbf{K} oder \mathbf{F} .

Durch diese Betrachtung des Anlagengraphen lassen sich die konventionellen Begriffe Konfiguration und Zustand vereinheitlichen. Beide Begriffe stellen nur noch unterschiedliche Transformationsvorgänge des Anlagengraphens dar (Abbildung 40). Es ist daher zulässig, beide Begriffe zusammenzufassen und nur noch den Begriff „Zustand“ zu verwenden.

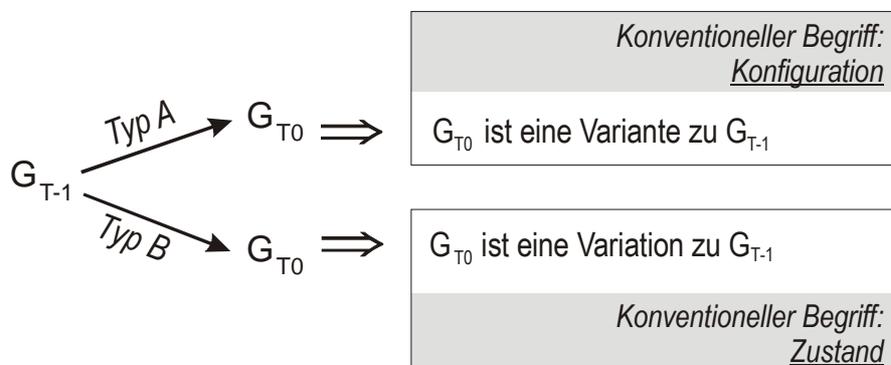


Abbildung 40 Mögliche Transformationen eines Anlagengraphen

Da der Anlagengraph also Zustand und Konfiguration simultan abbildet, lässt sich eine Zustandsverfolgung durch die Beobachtung der Transformationen des Anlagengraphen durchführen. Stellt eine Transformation einen hinsichtlich der Merkmale der Dekompositionsobjekte inkonsistenten Zustand des Anlagengraphen her, so ist eine Instandhaltungsmaßnahme notwendig. Ein inkonsistenter Zustand tritt immer dann ein, wenn die aktuellen Merkmalsausprägungen der Anforderungsfunktionen denen der restlichen Dekompositionsobjekte widersprechen. Setzt beispielsweise eine Störung einen Achsantrieb außer Betrieb, so kann eine Anforderungsfunktion „Werkstück bearbeiten“ nicht mehr effektiv sein.

Für die Zustandsbewertung bedeutet dies, dass Methoden beschrieben werden müssen, die Inkonsistenzen im Anlagengraphen aufdecken. Da eine Transformation immer durch ein Felddatum initiiert wird, muss geprüft werden, ob ein Felddatum eine unerwünschte Transformation auslöst. Methoden für diese Untersuchung werden im folgenden Kapitel entwickelt.

4.2.5 Auswertung von Felddaten mit dem Anlagengraphen

Der Anlagengraph modelliert sämtliche zustandsrelevanten Zusammenhänge zwischen den Dekompositionsobjekten einer Produktionsanlage. Entsteht nun ein Felddatum mit Bezug auf eines dieser Dekompositionsobjekte, so kann mit Hilfe des Anlagengraphen die Wirkung auf den Zustand der Anforderungsfunktionen ausgewertet werden. Entsprechend der Definition des geeigneten Zustands (Definition 2) muss die Auswertung feststellen, ob Effektivität oder Effizienz verletzt werden, und gegebenenfalls entsprechende Anliegen initiieren.

Die Anwendung des Anlagengraphen läuft immer in drei Grundschrinen ab. Ausgehend von einem beliebigen Dekompositionsobjekt wird zunächst der Spannbaum für dieses Dekompositionsobjekt bestimmt. Üblicherweise wird hier eine Anforderungsfunktion eingesetzt, dies ist jedoch nicht zwingend. Im Spannbaum sind nun alle Dekompositionsobjekte enthalten, denen relevante Felddaten zugeordnet werden können. Diese Felddaten werden selektiert und mit einer Rechenvorschrift verknüpft. Je nach Art der Auswertung ändert sich diese Rechenvorschrift. In den folgenden Kapiteln wird der Nachweis der Effektivität und die Bestimmung der Effizienz anhand des Kriteriums Instandhaltungskostenrate und Nettoproduktivzeit dargestellt.

4.2.5.1 Prüfung der Effektivität

Eine Anlage ist effektiv, wenn jede Anforderungsfunktion genutzt werden kann. Dazu ist es prinzipiell erforderlich, dass jede Funktion auch physikalisch realisiert ist, also Komponenten zugeordnet sind. So ist im Szenario die Anforderungsfunktion „hauptzeitparalleles Laden/Entladen“ nicht ausführbar, da weder ein Rüstplatz noch entsprechende

Vorrichtungen vorhanden sind. Der Anlagengraph weist hier eine Lücke auf (s. Anhang A4). Es muss daher ein Anliegen generiert werden, das die Einrichtung eines Rüstplatzes einfordert und somit die Effektivität wieder herstellt.

Um das Effektivitätskriterium (Definition 2) methodisch-formal zu prüfen, ist für jede Anforderungsfunktion eine funktionsfähige Realisierung nachzuweisen. Zunächst wird dazu der Spannbaum S für die zu untersuchende Anforderungsfunktion berechnet. Damit für die Anforderungsfunktion und ggf. ihre Unterfunktionen eine Realisierung vorliegt, müssen alle Blätter⁴⁰ des Baumes als komponentenorientierte Dekompositionsobjekte dargestellt sein. Die algorithmische Realisierung dieses Problems kann durch eine Pre-Order-Traversierung (s. [Sedgewick92]) erfolgen.

Zusätzlich ist zu untersuchen, ob alle Effektivitätsmerkmale der Anforderungsfunktion erfüllt werden. Ein Effektivitätsmerkmal, z.B. maximaler Laderaum, ist in den meisten Fällen ein objekteigenes Merkmal. Da ein objekteigenes Merkmal entlang eines beliebigen Propagationspfades unveränderlich und propagierbar ist, reicht es aus, wenn das geforderte Merkmal von einem Dekompositionsobjekt der Spannbaummenge erfüllt wird.

Die Effektivität ε_S einer durch den Spannbaum S modellierten Anforderungsfunktion wird nach Gl. 6 dargestellt.

$$\varepsilon_S = \begin{cases} 0: S \text{ ist nicht effektiv} \\ 1: S \text{ ist effektiv} \end{cases} \quad (\text{Gl. 6})$$

Das Effektivitätskriterium reagiert, wenn eine Variante des Anlagengraphens auftritt. Wird z.B. eine neue Anforderungsfunktion eingeführt, kann die Effektivität erst dann gleich 1 sein, wenn entsprechende Komponenten und Propagationsassoziationen definiert worden sind. In günstigen Fällen können die neuen Anforderungen mit vorhandenen Komponenten erfüllt werden, dann müssen nur zusätzliche Propagationsassoziationen in den Anlagengraphen eingefügt werden. In den meisten Fällen werden jedoch neue Komponenten notwendig sein. Solange einer Anforderung keine darstellenden Komponenten zugeordnet sind, bleibt $\varepsilon_S=0$. In der Praxis dient das Effektivitätskriterium damit der Absicherung der Integrität eines Anlagengraphen. Denn Prozesse, die die Struktur eines Graphen ändern (z.B. Umbaumaßnahmen), erfordern kreativen Einsatz der Ausführenden und können damit nur schlecht formalisiert gesteuert werden.

Die Effektivitätsfunktion ε_S kann erweitert werden, um zu bewerten, ob der Arbeitsplatz S zum aktuellen Zeitpunkt einsatzbereit ist. Nicht-verfügbare, weil defekte Komponenten werden dabei als nicht-existent angesehen. Die so berechnete *Gesamteffektivität* E_S

⁴⁰ Blätter sind die Knoten ohne Nachfolger am Ende der Zweige eines Baumes.

drückt aus, dass alle Funktionen realisiert und betriebsbereit sind. Für ihre formale Prüfung wird die Hilfsfunktion $b_d(t)$ eingeführt. Sie bewertet, ob die vom Dekompositionsobjekt d dargestellte Funktion oder Komponente zum Zeitpunkt t betriebsbereit ist (Gl. 7). Gl. 9 verknüpft die Einzelwerte aller Dekompositionsobjekte eines Arbeitsplatzes. Gl. 9 stellt die *Gesamteffektivitätsfunktion* E_S dar.

$$b_d(t) = \begin{cases} 0: d \text{ ist zum Zeitpunkt } t \text{ nicht betriebsbereit} \\ 1: d \text{ ist zum Zeitpunkt } t \text{ betriebsbereit} \end{cases} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\tau_S(t) = \prod_{d_a \in S} b_{d_a}(t) \quad \text{mit } S = \{d_1, \dots, d_n\} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$E_S(t) = \varepsilon_S \tau_S(t) \quad (\text{Gl. 9})$$

Vernachlässigt man in Gl. 8 die Zeitabhängigkeit, so entspricht sie einer boole'schen Systemfunktion für die betrachtete Anforderungsfunktion. Eine boole'schen Systemfunktion kann also formal aus einem Anlagengraphen abgeleitet werden. Die Einschränkungen der Systemmodellierung nach Boole haben bei dieser Anwendung keine Bedeutung, da in Produktionsanlagen keine redundanten Komponenten vorhanden sind und der Betriebszustand jedes Dekompositionsobjekts unabhängig und dual darzustellen ist. Die Berechnung der theoretischen Verfügbarkeit über τ_S wird jedoch keine relevanten Ergebnisse liefern. Denn für diese Auswertung ist die statistische Datengrundlage mit einer Stichprobengröße 1 zu klein.

Die entwickelten Methoden sollen nun am Beispielszenario angewandt werden. Für die Bestimmung der Effektivität ε_S zeigt Abbildung 41 einen Ausschnitt aus dem Anlagengraphen. Hier ist die Funktion „Be/Entladen Ladungsträger“ nicht realisiert. ε_S ist damit 0 und daher wird ein Anliegen „Aufbau Be/Entladestation“ erzeugt. Entsprechend des Phasenmodells nach Tabelle 3 wird dieses Anliegen in Phase 1 begonnen. Dies bedeutet, dass für die anstehende Aufrüstmaßnahme bislang Konzept, Kosten und Zeiten unbekannt sind.

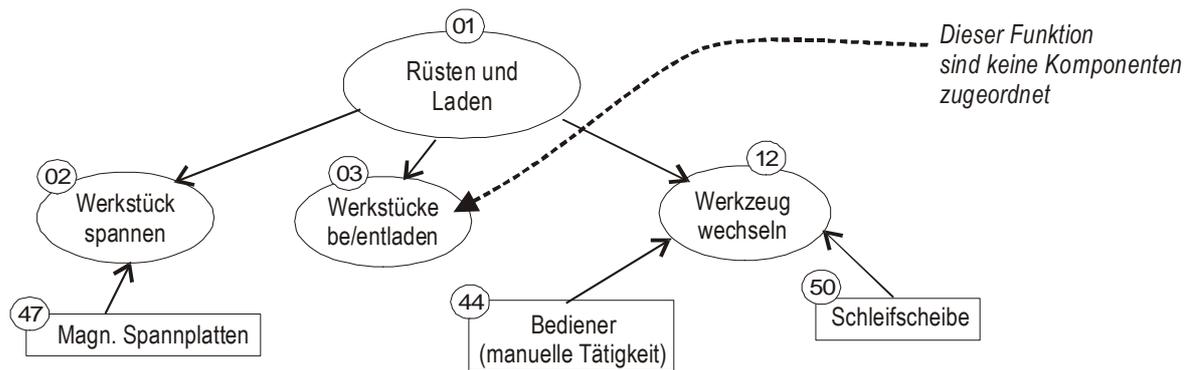


Abbildung 41 Nachweis der Effektivität im Anlagengraphen, Ausschnitt aus Anhang A4

Für die Bestimmung der Gesamteffektivität E_S wird zunächst die Betriebsbereitschaftsfunktion τ_S berechnet. Für diese Berechnung wird für alle Dekompositionsobjekte des Spannbauums einer Anforderungsfunktion geprüft, ob ein Felddatum mit Stillstandsmeldung existiert. Dabei kann nach der ersten Meldung abgebrochen werden, denn dann wird ein Faktor in Gl. 8 gleich null und somit auch τ_S . Tabelle 20 fasst für die Anforderungsfunktionen die Ergebnisse der Felddatenauswertung zusammen. Für die Anforderung⁴¹ 08 (*Werkstück bearbeiten*) meldet das Felddatum 13 einen Stillstand. Da es sich hier um einen Anlagenstillstand handelt, wurde ein entsprechendes Anliegen bereits durch direkte Maßnahmeneinleitung generiert. Die Anliegen O und P in Anhang A3 entsprechen diesen neuen Maßnahmen.

Tabelle 21 Ergebnisse des Abgleichs der Anforderungsfunktionen mit Anlagengraphen und Felddaten

Pos	Anforderungsfunktion	ε_S	τ_S	E_S	Bemerkung
01	Werkstück zu-/abführen	0	1	0	Realisierung Be/Entladestation fehlt an Pos 01
08	Werkstück bearbeiten	1	0	0	Abrichtgerät Pos 35 defekt – Anlage steht
13	Werkerselbstprüfung durchführen	1	1	1	--
16	Gehäuse, Ergonomie	1	1	1	--
51	Kühlschmierung	1	1	1	--

⁴¹ Siehe Anhang A4

4.2.5.2 Prüfung der Effizienz

Der hinreichende Zustand (vgl. Definition 4) ist erst erreicht, wenn die Fertigung von Produkten effizient erfolgt. Effizienzmaße sind ein Controllinginstrument, um Schwachpunkte zu erkennen (z.B. Unterschreiten wirtschaftlicher Grenzwerte oder Benchmarks) oder um die Wirksamkeit einer Maßnahme nachzuweisen. Bei der Berechnung von Effizienzmaßen müssen daher sowohl ein Akzeptanzintervall als auch der Betrachtungszeitraum berücksichtigt werden.

Mit der Basismethode der Auswahl von Felddaten aus einem Anlagengraphen lassen sich beliebige Effizienzgrößen, wie z.B. Prozessfähigkeit oder Ersatzteilverbrauch, bestimmen, solange deren Basisdaten im Anlagengraphen erfassbar sind. Beispielhaft sollen im folgenden die Größen Instandhaltungskostenrate und Nettoproduktivzeit für das Szenario berechnet werden.

4.2.5.2.1 *Effizienzmaß: Instandhaltungskostenrate*

Eine Effizienzkenngroße sind die absoluten Instandhaltungskosten K . Typischerweise steht für einen Unternehmensbereich ein Instandhaltungsbudget zur Verfügung, gegen das die Bewertung der bereits angefallenen Instandhaltungskosten erfolgt. Als relative monetäre Bewertungsgröße wird häufig die Instandhaltungskostenrate Q angewendet. Q ist das Verhältnis von Instandhaltungsaufwendungen K zum Wiederbeschaffungswert W eines Instandhaltungsobjekts. Entsprechend dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz sind K und Q jeweils pro Anforderungsfunktion für eine Periode zu bestimmen. Um die Instandhaltungskosten einer Periode zu berechnen, sind die Kosten sämtlicher Maßnahmen zu summieren. K ist die Summe der Einzelkosten k der Instandhaltungsmaßnahmen in der Betrachtungsperiode t_0-t_1 , die an den Dekompositionsobjekten d des Arbeitsplatzes S angefallen sind (Gl. 10).

$$K = \sum_{d_a \in S} \lfloor k_{d_a} \rfloor_{t_0-t_1} \quad (\text{Gl. 10})$$

Die Instandhaltungskostenrate Q ist definiert als Quotient aus Instandhaltungskosten K und Wiederbeschaffungswert W eines identischen Instandhaltungsobjektes. Der Wiederbeschaffungswert W wird anhand des Wiederbeschaffungswert-Faktors f_{WBW} [StatJahrb89, StatJahrb97] und der Investitionskosten bestimmt. Da f_{WBW} nicht ausschließlich auf materielle Güter bezogen ist, kann er auf das Instandhaltungsobjekt ‚Anforderungsfunktion‘ angewandt werden.

Ein typisches Problem bei der Berechnung der Instandhaltungskostenrate ist die Bestimmung des Wiederbeschaffungswertes von Anlagen, in die über die ursprüngliche Anschaffung hinaus investiert wurde. Da Aufwendungen zur Anpassung an geänderte

Anforderungen als Investition zu betrachten sind, müssen diese Kosten von den Aufwendungen zur Kompensation von Degradation getrennt werden.

Beide Kostenarten können über die Auswertung des Anlagengraphen unterschieden werden. Voraussetzung dafür ist, dass jeder Maßnahme eine Konfigurationsänderung im Anlagengraphen zuzuordnen ist. Maßnahmen, die auf Variationen zurückgehen, sind der Anlagenerhaltung zuzurechnen. Maßnahmen, die eine Variante erzeugen, sind dagegen als Investition zu betrachten.

Mit dieser Aufteilung ergibt sich für den Wiederbeschaffungswert W die Summe aus Grundinvestition I und Kosten i der durchgeführten Investitionen mal dem Wiederbeschaffungswert-Faktor f_{WBW} (Gl. 11). Als Berechnungsperiode wird die gesamte Lebensdauer der betrachteten Anlage zugrunde gelegt. Daher ist zu berücksichtigen, dass für eine Investition der Wiederbeschaffungswert-Faktor des Investitionsjahres angewandt wird. Mit dem so bestimmten Wiederbeschaffungswert kann die Instandhaltungskostenrate für die aktuelle Betrachtungsperiode bestimmt werden. Da in die Berechnung der Instandhaltungskosten K die innerhalb der Betrachtungsperiode getätigten Investitionen j eingegangen sind, muss K für die Berechnung der Instandhaltungskostenrate Q um diesen Betrag verringert werden. Es ergeben sich die Gleichungen Gl. 12 und Gl. 13 für die Berechnung von Q .

$$W = f_{WBW} \cdot I + \sum_{d_a \in S} \lfloor f_{WBW} \cdot i_{d_a} \rfloor_{Lebensdauer} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$j = \sum_{d_a \in S} \lfloor f_{WBW} \cdot i_{d_a} \rfloor_{t_0-t_1} \quad (\text{Gl. 12})$$

$$Q = \frac{K - j}{W} \times 100\% \quad (\text{Gl. 13})$$

Für die Berechnung der Instandhaltungskosten des Beispielarbeitsplatzes werden alle anstehenden und abgearbeiteten Anliegen und die Basisinvestition des Arbeitsplatzes herangezogen. Felddaten brauchen nicht berücksichtigt zu werden, da Felddaten keine Kosteninformation beinhalten. Für jedes Anliegen ist nun nachzuschlagen, ob es im Anlagengraphen auf eine Variation zurückgeht oder eine Variante erzeugte. Wurde eine Variante erzeugt, so sind die Kosten den Investitionen zuzurechnen, andernfalls sind es Erhaltungskosten.

Die für unternehmerische Entscheidungen wichtige Klassifizierung von Kosten nach Ist- und Erwartung sowie Erfassung von Risiken ist über die Auswertung der Phase von Anliegen möglich. Kosteninformationen für Anliegen in Phase 5 sind dem Ist zuzurech-

nen. Für Anliegen der Phasen 3 und 4 können die Zielkosten in die Erwartung übernommen werden. Für Anliegen in den Phasen 1 und 2 sind höchstens unkonsolidierte Schätzkostenwerte verfügbar. Diese sind daher als Risiko der Erwartung zuzuschlagen. Für die Anliegen des Szenarios ist diese Aufteilung im Anhang A3 dokumentiert. Zur Bestimmung der Instandhaltungskostenrate werden müssen alle Erhaltungskosten der aktuellen Periode summiert werden. Dabei müssen auch noch nicht realisierte Schätzkosten offener Maßnahmen berücksichtigt werden. Nur dann kann eine Vorschau gegeben werden, welchen Wert die Instandhaltungskostenrate am Periodenende haben wird. Im Beispiel ergibt sich eine prognostizierte Instandhaltungskostenrate von 5,18% zum Periodenende. Dies liegt deutlich über dem Zielwert von 4,0%. Daher wird für den Beispielarbeitsplatz ein Anliegen erzeugt, dessen Ziel die Einhaltung des Effizienzmaßes zur nächsten Berichtsperiode ist (Anliegen Q, Anhang A3). Diese Maßnahme dokumentiert zunächst nur die Zielabweichung und operationalisiert die (negativen) Zielkosten. Da keine konkrete technische Maßnahme hinterlegt ist, ist durch dieses Anliegen ein Risiko der Zielkostenabweichung dokumentiert. Auf diese Weise wird die Aufstellung eines Chancen-Risiko-Profiles unterstützt, in diesem Fall bezogen auf die Größe Instandhaltungskostenrate. Abbildung 42 zeigt den Kostenstatus des Arbeitsplatzes im Überblick.

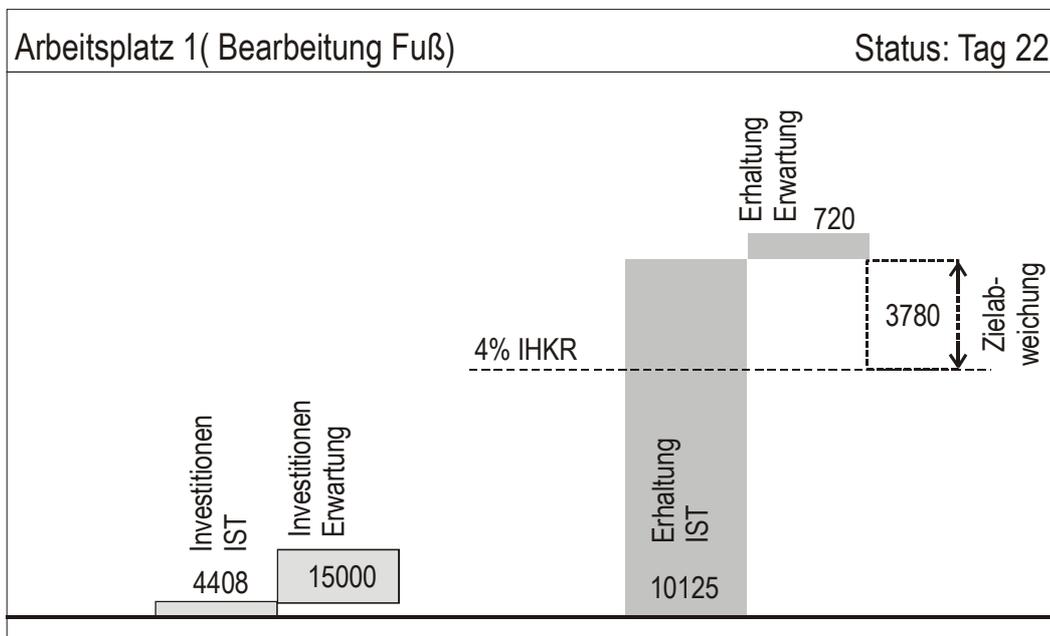


Abbildung 42 Zusammenfassung des Kostenstatus für das Szenario

4.2.5.2.2 Effizienzmaß: Nettoproduktivzeit

Die Gruppe der Kennzahlen zur Verfügbarkeit genießen in der Praxis hohe Aufmerksamkeit. Aus diesem Grund soll eine Berechnung der Verfügbarkeit A über den Anlagengraphen beschrieben werden. Diese Berechnungsvorschrift wird dann ohne eine methodische Änderung zur Bestimmung der vollständigen Nettoproduktivzeit N erweitert.

Der Berechnung liegt das Modell der zeitlichen Struktur der Verfügbarkeit zugrunde (Abbildung 13). Infolge der nicht-redundanten Auslegung von Produktionsanlagen steht ein Arbeitsplatz still, sobald eines seiner Dekompositionsobjekte still steht. Die Verfügbarkeit A berechnet sich daher aus dem Zeitintegral der Betriebsbereitschaftsfunktion⁴² τ_S über die Betrachtungsperiode $[t_1, t_2]$:

$$A = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \tau_S(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (\text{Gl. 14})$$

Im Zeitverlauf der Betriebsbereitschaftsfunktion für ein Dekompositionsobjekt treten die Ereignisse Stillstandsbeginn und Inbetriebnahme immer paarweise auf. Dabei wird der Stillstandsbeginn durch ein Felddatum, die Wiederinbetriebnahme jedoch von einem Anliegen beschrieben. Diese Trennung ist notwendig, da eine Inbetriebnahme immer im Rahmen der Abarbeitung eines Anliegens erfolgen muss. Felddaten sind somit ungeeignet, um das paarweise Auftreten von Stillstandsbeginn und Inbetriebnahme abzubilden.

Aus diesem Grund erfolgt die Berechnung der Verfügbarkeit auf der Basis von Anliegen. Mit jedem Anliegen muss daher auch ein eventuelles Stillstandsintervall dokumentiert werden. Dieses Vorgehen erfordert keinen betriebsorganisatorischen Mehraufwand, da

- Stillstände nur in einer Form erfasst werden.
- auf eine Störung mit Stillstand in der Regel mit direkter Maßnahmeneinleitung ein entsprechendes Anliegen generiert wird.

⁴² Alternativ lässt sich die Gesamteffektivität E_S einsetzen. Dann werden Effektivitätsverluste infolge von nicht realisierten Funktionen berücksichtigt. Auf die besondere Problematik eines solchen Ansatzes wird in Kapitel 5.2.2 eingegangen.

- Stillstände im Rahmen von präventiven Instandhaltungsmaßnahmen nicht gesondert erfasst werden müssen.

Betrachtet man entsprechende Daten aus einer realen Fertigung, so wird deutlich, dass Überschneidungen der Ausfallzeiten einzelner Funktionen einer Anlage üblich sind (Abbildung 43, Intervall $t_3...t_5$). Solche Unstimmigkeiten in den Realdaten sind zum einen auf Ungenauigkeiten der Rückmeldung zurückzuführen. Zum anderen können sie auch durch spontane Blockbildung von Instandhaltungsmaßnahmen eintreten. Der Stillstand $d_1, t_3...t_4$ kann z.B. eine präventive Maßnahme beschreiben, die im Rahmen der Entstörung $d_2, t_3...t_5$ vorgezogen wurde und zusätzlich „Anlagenstillstand“ markiert wurde. Solche Überschneidungen werden bei der Verfügbarkeitsberechnung mit Hilfe der Betriebsbereitschaftsfunktion korrigiert.

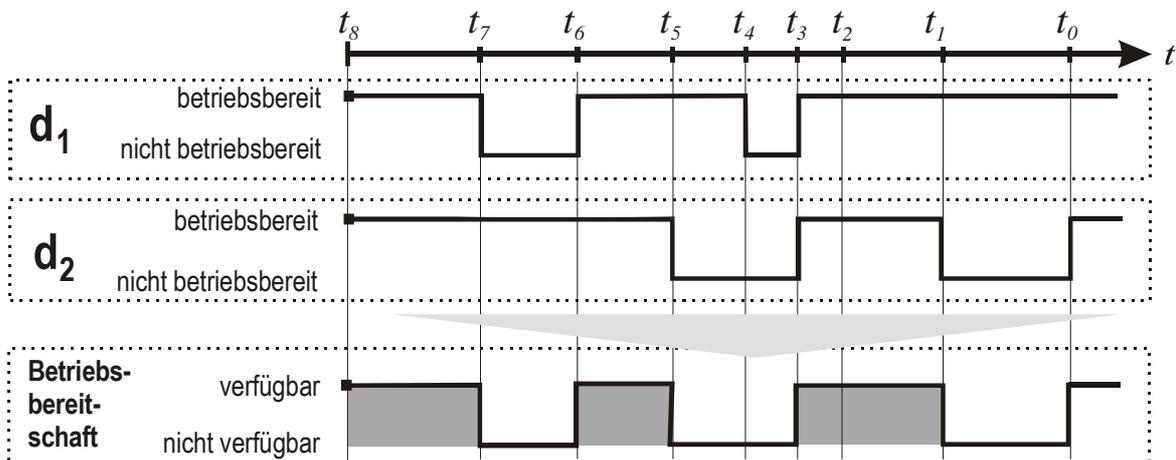


Abbildung 43 Berechnung der Anlageneffizienz

Für die Darstellung des Zeitverlaufs der Betriebsbereitschaftsfunktion werden nur Anliegen herangezogen, die Zeitpunkte für Beginn und Ende eines Stillstands dokumentieren. Diese Anliegen werden nach Startzeitpunkt chronologisch sortiert. Die Integration nach Gl. 14 zur Berechnung der Verfügbarkeit A kann dann durch eine Summenfunktion ersetzt werden (Gl. 15). n indiziert dabei die Ereigniszeitpunkte in chronologischer Reihenfolge.

$$A = \frac{1}{t_0 - t_n} \sum_{a=n}^1 (t_{a+1} - t_a) \tau_s(t_a) \quad (\text{Gl. 15})$$

Der große Vorteil dieser Methode ist die leichte Berechnung der Nettoproduktivzeit N unter Berücksichtigung von Rüstzeiten und Prozessfehlern. Beide Größen können als Felddaten in die Berechnung aufgenommen werden. Um beispielsweise den Stillstand während eines Rüstvorgangs darzustellen, wird ein Anliegen erzeugt, das dem Dekom-

positionsobjekt *Werkzeug wechseln* eine Stillstandzeit von der Dauer der Rüstzeit zuordnet. Durch diese virtuelle Störung geht die Rüstzeit in die Berechnung der Nettoproduktivzeit ein.

Um auch Qualitätsfehler in die Berechnung der Nettoproduktivzeit einfließen zu lassen, wird für jedes Ausschuss- oder Nacharbeitsteil ebenfalls eine virtuelle Störung angelegt. Diese Störung wird dabei derjenigen Anforderungsfunktion zugeordnet, die für den jeweilige Fertigungsfehler ursächlich ist. Als Dauer einer solchen virtuellen Störung ist die jeweilige Hauptzeit anzusetzen.

Gerade für die Einbeziehung von Qualitätsfelddaten in die Berechnung der Nettoproduktivzeit ist das methodische Vorgehen über den Anlagengraphen vorteilhaft. Ohne Anlagengraph muss fallweise die verursachende Funktion ermittelt werden. Steht hingegen ein Anlagengraph zu Verfügung, so kann anhand der abgebildeten und in Fertigungsketten gegliederten Funktionen ein Fertigungsfehler systematisch zugeordnet werden. Diese explizite Möglichkeit der Zuordnung wird durch den Aufbau von Anlagengraphen geschaffen.

Im Anhang A5 ist der Zeitverlauf der Betriebsbereitschaftsfunktion für das Beispielszenario graphisch dargestellt. Aus der Anwendung von Gl. 15 auf diese Daten folgt, dass die Anlageneffizienz mit 80% oberhalb des geforderten Werts von 75% liegt. Auffällig sind die regelmäßigen Störungen der Anforderungsfunktion 08 *Werkstück bearbeiten* und der ihr zugeordneten Querschnittsfunktion 34 *Steuerung*. Für Fehler in dieser Art hat sich das Kühlschmiermittel als Verursacher herausgestellt. Als Maßnahme werden zwei Anliegen M und N erzeugt, die dieses Problem beheben. Anliegen M „*Durchsatz erhöhen*“ kann einfach und kostengünstig ausgeführt werden. Anliegen N „*Neues induktives Messsystem*“ erfordert jedoch eine Investition. Da diese eigentlich unerwünscht ist, wird das Anliegen in Phase 2 gestartet und die Kosten zunächst als Risiko eingestuft.

4.2.6 Einbindung in den Tätigkeitszyklus

Die Anwendung des Anlagengraphen im Tätigkeitszyklus der Instandhaltung ermöglicht eine systematische Unterstützung der Instandhaltungsanalyse (Abbildung 44). Vorteilhaft ist die Integration der Verfolgung sowohl des Ist-Zustands als auch des Soll-Zustands. Beide Informationen können über den Anlagengraphen abgebildet werden. Des weiteren wird der Soll-Zustand praxisnah über Anforderungsfunktionen und eine Gliederung in Arbeitsplätze dargestellt. Für die Ermittlung des Ist-Zustands bietet der Anlagengraph eine systematische Lösung, um Felddaten aus verschiedenen Datenquellen in einer einzigen Bewertungsmethode integriert auszuwerten. Insbesondere für Qualitätsdaten ergibt sich eine neue Nutzungsmöglichkeit. Da alle Arten von instandhal-

5 Ergebnisse und ihre Bedeutung

5.1 Zusammenfassung

Die Beobachtung des Ist-Zustands von Produktionsanlagen und dessen Bewertung hinsichtlich des Soll-Zustands ist eine wesentliche Aufgabe der Instandhaltung. Da bislang keine Systematik existiert, die den Ist-Zustand kontinuierlich ermittelt und diesen mit dem Soll-Zustand vergleicht, wird die Zustandsbewertung meistens situativ durchgeführt.

Anstatt der situativen Erfassung wurde in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das mit den verfügbaren Rückmeldungen der Fertigung eine Zustandsbewertung vornimmt. Rückgrat dieses Verfahrens ist der Anlagengraph, der es ermöglicht, beliebige Rückmeldungen jeweils einer Anforderungsfunktion des Soll-Modells zuzurechnen. Der Anlagengraph weist Analogien mit den Dokumenten einer FMEA auf, die ebenfalls die Beziehungen von Funktionen und Komponenten eines technischen Produktes zeigen. Gegenüber einer anwendungsneutralen Konstruktions-FMEA zeigt der Anlagengraph jedoch die Beziehungen einer Anlage zu einer genau definierten Umwelt. Diese Umwelt, die im Anlagengraph in Form von Anforderungsfunktionen abgebildet ist, wird bei einer FMEA nicht erfasst.

Es wurde erkannt, dass ein Anlagengraph äquivalent zu einer Konfigurationsbeschreibung einer Produktionsanlage ist. Diese Äquivalenz ist die Grundlage des Ansatzes, jedes instandhaltungsrelevante Ereignis auf eine Konfigurationsänderung abzubilden. Dadurch wird es möglich, sämtliche Arten von Instandhaltungsmaßnahmen durch eine integrierte Methode abzuwickeln.

Instandhaltungsmaßnahmen erzeugen wiederum Konfigurationsänderungen im Anlagengraphen, der so die Historie dokumentiert. Gegenüber der üblichen, listenorientierten Historienführung verknüpft der Anlagengraph Maßnahmenursache, Maßnahme und

Maßnahmenergebnis miteinander. Damit bietet der Anlagengraph einen Ansatz, den Lebenszyklus einer Anlage kontinuierlich zu begleiten (Abbildung 45).

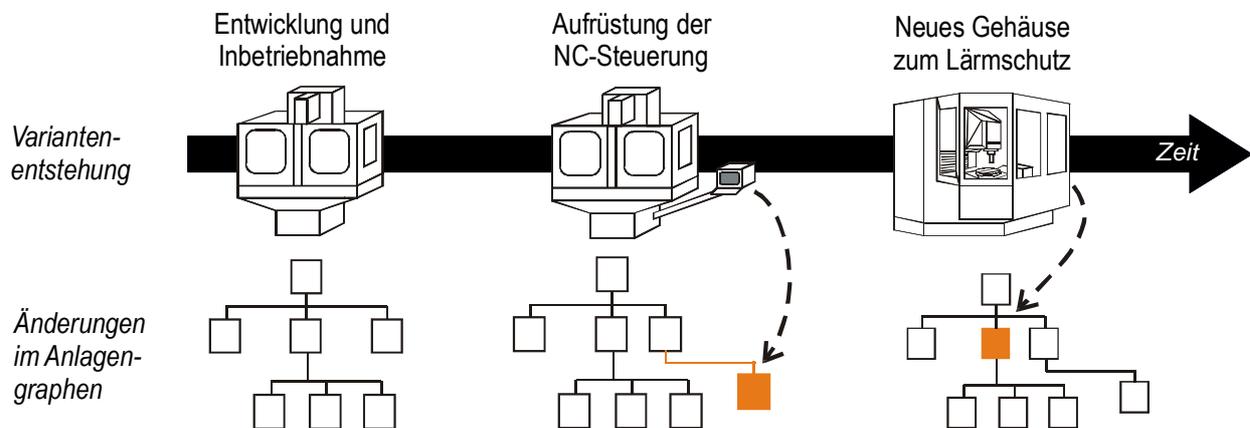


Abbildung 45 Entwicklung eines Anlagengraphen über die Zeit

Mit diesem Vorgehensmodell lassen sich die Prämissen für eine Zustandsverfolgung (vgl. Kapitel 1.4) erfüllen:

Prämisse 1:

Die Anforderungen des Produktionssystems, in das die betrachteten Produktionsanlagen eingebunden sind, müssen explizit abgebildet sein.

- ⇒ Anforderungen sind in Form von Funktionen direkt im Anlagengraph abgebildet und eindeutig den realisierenden Produktionsanlagen zugeordnet. Zugleich wird der von [LemkeEichler98] geforderte Bezug der Schwachstellenanalyse zu den Produktionsaufgaben durch den Anlagengraphen ermöglicht.

Prämisse 2:

Veränderungen des Soll-Zustands müssen ebenso wie Veränderungen des Ist-Zustands erkannt und berücksichtigt werden.

- ⇒ Änderungen von Soll oder Ist werden ungeachtet ihres Typs im Anlagengraph als Konfigurationsänderungen dargestellt. Eine Konfigurationsänderung erzwingt in der vorgestellten Methode immer eine Neubewertung von Effektivität und Effizienz. Somit erlaubt der Anlagengraph eine reaktionsschnelle Einleitung von Maßnahmen, unabhängig davon, ob Soll oder Ist geändert wurden.

Prämisse 3:

Die Zustandsverfolgung muss kontinuierlich arbeiten.

- ⇒ Eingegangene Felddaten werden algorithmisch in den bereits bestehenden Datenpool eingeordnet. Durch die vorab festgelegten Auswertungsregeln für Felddaten entfällt die Notwendigkeit, situative Vor-Ort-Betrachtung des Ist-Zustandes als Regelprozess durchführen zu müssen.

Prämisse 4:

Die Verfolgung des Ist-Zustands muss auf der Basis verfügbarer, aber teilweise unsicherer Felddaten arbeiten können.

- ⇒ Jedes Felddatum wird, unabhängig von seiner Herkunft oder Art, durch den Anlagengraph einer Anforderungsfunktion zugerechnet. Über Relevanz und Priorität eines so erkannten Anliegens wird im Managementprozess für Anliegen entschieden, so dass die richtigen Anliegen priorisiert werden.

Zugleich ergeben sich aus dem Einsatz von Anlagengraphen weitere Vorteile für das Instandhaltungsmanagement:

- Neben einer konsequenten Führung der Anlagenhistorie liegt ein großer Vorteil des Anlagengraphen in der Dokumentation des Anlagenwissens. Denn für jede Anlage sind aktuelle Konfiguration und funktionale Anforderungen dokumentiert.
- Die Historienführung im Anlagengraph erlaubt eine einfach zu durchschauende Trennung von Maßnahmen in Investition und Anlagenerhaltung. Investitionsmaßnahmen folgen aus Varianten, Erhaltungsmaßnahmen aus Änderungen in Variationen. Damit kann eine klare Gliederung der Instandhaltungskosten erfolgen, eine Voraussetzung für die richtige Kalkulation der Instandhaltungskostenrate.
- Infolge der bekannten Produkte und der daran abgearbeiteten Funktionen kann eine arbeitsplatzspezifische Rückmeldetabelle einfach erstellt werden. Da jedes Dekompositionsobjekt einen möglichen Bezug für eine Rückmeldung aus der Fertigung darstellt, ergibt sich aus dem Anlagengraphen die optimale Menge von Rückmeldecodes. Mitarbeiter, die eine Meldung abgeben, müssen aus dieser Menge einen Bezug wählen. Sie bevorzugen hier eine kurze, prägnante Auswahlliste, zu umfangreiche Auswahlmöglichkeiten führen häufig zum Ignorieren der Details zugunsten einer allgemeinen Aussage. Der Anlagengraph unterstützt den zielgerichteten Erfassungsprozess, da auf den jeweiligen Arbeitsplatz in der richtigen Detaillierung Rückmeldecodes angeboten werden. Rückmeldungen erhalten eine hö-

here Qualität, ohne dass aufwändige Algorithmen oder Schulung erforderlich werden. Zudem können mit dem Aufbau eines Anlagengraphen die richtigen, angepassten Rückmeldecodes für einen Arbeitsplatz definiert werden. Im Vergleich mit den von [Ebner96] vorgeschlagenen Wörterbüchern zur Rückmeldung liegt durch den stringenten Ansatz der Dekomposition eine Richtlinie zur Erstellung dieser Wörterbücher vor.

5.2 Offene Fragen

In der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode ergeben sich weitergehende Fragen, die im folgenden kurz diskutiert werden. Es ist jedoch nicht angestrebt, eine erschöpfende Antwort auf diese Fragen zu geben:

- Ist es möglich, auf der Basis von Anliegen eine quantitative Zustandsmetrik zu definieren?
- Ist es zulässig, Effizienzkennzahlen über Perioden zu berechnen, in denen eine Variante erzeugt wurde?

5.2.1 Aufbau einer quantitativen Zustandsmetrik

Das Konzept der „Anliegen“ kann als eine Zustandsmetrik betrachtet werden, in dem die Anzahl der Anliegen den „Abstand“ vom geeigneten Zustand angibt: Je mehr Anliegen an einer Anlage vorliegen, desto schlechter wird ihr Zustand sein.

Der einfache Ansatz über die Anzahl führt jedoch zu einer Überbewertung von Bagatellen.

Der Ansatz, jedes Anliegen mit seinem Kostenaufwand zu gewichten und so eine detailliertere und genauere Zustandsaussage zu erhalten, führt ebenso zu keiner belastungsfähigen Aussage. Für wiederkehrende Maßnahmen mit einem definierten Arbeitsinhalt, z. B. Wartung, können zwar gute Ergebnisse erzielt werden, diese sind jedoch nicht auf alle Maßnahmenarten übertragbar. Denn die Aufwandsabschätzung unterliegt Unwägbarkeiten, die in den Entwicklungsphasen eines Anliegens ersichtlich sind (vgl. Tabelle 3). So ist in Phase 1 eines Anliegens prinzipiell kein Lösungsaufwand bekannt, da seine Abschätzung erst in Phase 2 erfolgt. Dennoch ist ein Anliegen bereits bekannt und muss daher gewichtet werden. Es könnte zwar zunächst ein Standardarbeitsplan angesetzt werden, doch diese Lösung gaukelt eine Scheingenauigkeit vor, da kein annähernd exakter Arbeitsumfang bestimmt ist.

Um einzelne Anliegen zu gewichten, wäre eine Systematik notwendig, die in Fällen von nicht ausgeplanten Maßnahmen das Kostenrisiko hinlänglich bewertet. Diese Risikobewertung könnte dann ergänzend zu Standard-Arbeitsplänen eingesetzt werden.

5.2.2 Sensitivität berechneter Effizienz Kennzahlen bei Variantenbildung

Effizienz Kennzahlen werden aus innerhalb einer Betrachtungsperiode entstehenden Daten berechnet. Meistens wird die Betrachtungsperiode gewählt, um unternehmenstypische Berichtsperioden (z.B. den Jahresabschluss) zu berücksichtigen. Diese Auswahl der Betrachtungsperiode berücksichtigt aber nicht, dass innerhalb der Periode Varianten der betrachteten Anlagen entstanden sein könnten. Ändert sich dabei das Ursache-Wirkungsgefüge, so kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die bislang ermittelten Eigenschaften und Kennzahlen der Anlage weiterhin gültig bleiben. Es ist nicht mehr sichergestellt, dass die verarbeiteten Daten unter annähernd gleichen Umweltbedingungen entstanden sind und somit eine aussagekräftige Kennzahl bestimmt wird. Zur Lösung des Problems ist zu klären, wie die Modifikation einer Komponente das Verhalten des Gesamtsystems ändert. Für viele praktische Fälle der Instandhaltung hat diese Frage geringe Bedeutung. Sie wird immer dann relevant, wenn umfangreiche Umbauten an einer Anlage vorgenommen wurden. Tritt ein solcher Fall ein, sollte zumindest eine Expertenbewertung erfolgen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist jedoch eine eigenständige theoretische Untersuchung dieses Problems notwendig. Ziel einer solchen Untersuchung sollte sein, Varianten, die einen Kontinuitätsbruch hervorrufen, systematisch zu erkennen.

Als einfache Lösung bietet sich an, Betrachtungsperioden jeweils durch Zeitpunkte von Konfigurationsänderungen zu bilden. Diese Trennung ist auch hilfreich, um nach Investitionen in einer Vorher-Nachher-Darstellung den Nutzen der Maßnahme nachzuweisen (Abbildung 46). Bei einer klaren Trennung können sowohl eine Hochlaufphase als auch das Erreichen eines erwarteten Niveaus des Effizienzmaßes beobachtet werden.

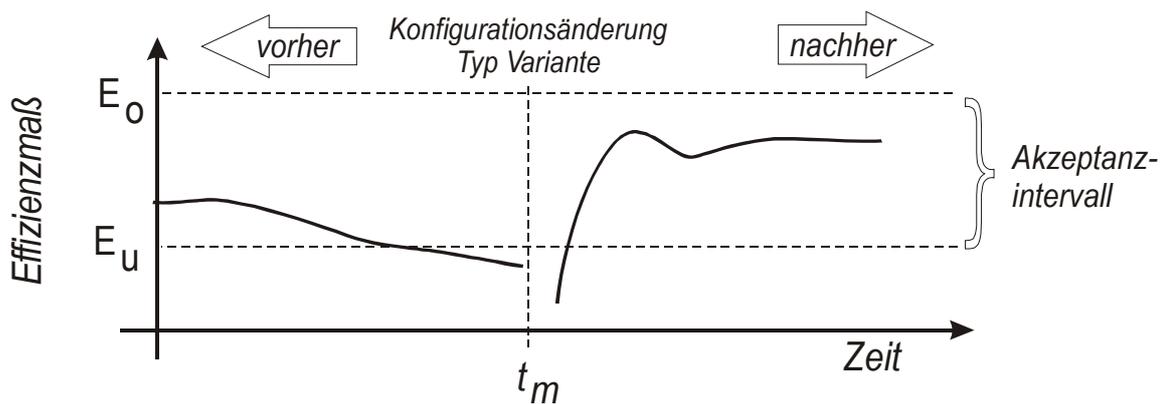


Abbildung 46 Zeitlicher Verlauf eines Effizienzmaßes und Einfluss einer Konfigurationsänderung (schematisch)

Die Effizienzkennzahlen der Instandhaltung haben zudem stochastischen Charakter. Um diese Eigenschaft der Kennzahlen bei der Darstellung eines Zustands zu berücksichtigen, müssten statt einzelner Maschinen Kollektive untersucht werden. Bei den Fähigkeitsgrößen⁴³ C_p und C_m ist dies ein Teil der Verfahrensanweisungen, für Größen wie Verfügbarkeit oder Ausfallrate sind jedoch selten Kollektive ausreichender Größe vorhanden. Einen Ansatz, gezielt die Ausgangsdaten für diese Berechnungen im Lebenszyklus in einem ausreichend großen Kollektiv zu erfassen, beschreibt [Niestadtkötter01]. Bei diesem Vorgehen geht allerdings das Wissen um die speziellen Betriebsbedingungen verloren, unter denen einzelne Daten entstanden sind [vgl. Ebner96]. Denn um Vergleichbarkeit sicherzustellen, müssten die spezifischen Umgebungsbedingungen im Betrieb erfasst und berücksichtigt werden.

Berechnete Effizienzkennzahlen unterliegen damit den Einschränkungen *gleiche Konfiguration* und *Größe der Stichprobe=1*. Für die Praxis heißt dies zunächst, dass aus den gewonnenen Kennzahlen keine statistisch sicheren Größen wie MTBF abgeleitet werden können. Der Zeitpunkt des nächsten Ausfalls einer Anlage bleibt damit weiterhin unvorhersehbar. Ausgenommen sind jedoch Kenngrößen, die rückblickenden Charakter haben, z.B. Kosten oder Nettoproduktivzeit. Diese Größen quantifizieren Zusammenhänge wie „in der Vergangenheit haben wir mit Maßnahme x den Effekt y erreicht“. Diese Größen sind nicht als stochastisch anzusehen, sondern dienen der Bewertung der Vergangenheit. Werden solche Größen auffällig, so sollte der Handlungsbedarf in Form eines Anliegens in Phase 1 bewertet werden.

⁴³ Siehe Kapitel 2.1.1.2

5.3 Ausblick

Die Anwendungsbreite der vorgestellten Vorgehensweise wächst mit dem Datenbestand, der als Vergleichsbasis zugänglich ist. Gleichzeitig wächst der Nutzen für den Anwender, wenn Maschinenkonfigurationen einfach zugänglich sind und nicht erst aufwändig erfasst werden müssen. Da die Verwaltung und Bereitstellung solcher Daten Kernaufgaben von EDM-Systemen⁴⁴ sind, soll im abschließenden Abschnitt dieser Arbeit ein Ausblick auf die Verknüpfung von EDM und Instandhaltungssystemen zu einem neuartigen Teil der Digitalen Fabrik gegeben werden.

Originär sind alle Maschinen in den Dokumentationssystemen der Hersteller abgelegt. Über eine Mehrwertdienstleistung eines Anlagenherstellers könnten diese Daten den Anlagenbetreibern zugehen, die diesen Datenbestand mit ihrem IPS abgleichen. Sowohl Hersteller als auch Betreiber verfügen damit über einen identischen Datengrundstock. Für den Hersteller ergibt sich die Möglichkeit, aussagekräftige Rückmeldungen aus dem Betrieb zu gewinnen, die direkt in seine Datenwelt einfließen. Der Betreiber kann pro-aktiv handeln, da Schwachstellen über eine größere Grundgesamtheit von Anlagen erkannt und publiziert werden.

Verfolgt man Struktur und Attribute eines Anlagengraphen über die Zeit, so wird deutlich, dass Konfigurationen dynamisch sind (Abbildung 45). Bei Investitionsgütern wie Produktionsanlagen entwickeln sich typgleiche Maschinen nach der Inbetriebnahme individuell weiter. Im Laufe der Zeit können sich Maschinenkonfigurationen entwickeln, die in dieser Form nicht vom Maschinenhersteller vorgesehen waren, die jedoch auf bestimmte Anforderungen hin angepasst wurden. Wird nun für eine ähnliche Anforderungssituation eine Lösung gesucht, können die bereits bekannten Lösungen betrachtet werden. Über den Schritt der Abbildung von Anlagen kann die Best-Practice-Lösung für eine Aufgabe gefunden werden.

Im Gegensatz zu der bisher beschriebenen Methode, Konfigurationsänderungen einer einzelnen Anlage über die Zeit zu verfolgen und zu bewerten, ist für den Best-Practice-Zweck der Vergleich von verschiedenen, bekannten Konfigurationen notwendig. Sind mehrere Anlagen vorhanden, so können diese miteinander verglichen werden, um z.B. eine geeignete Verbesserungsmaßnahme zu bestimmen. Grundidee ist, dass zwei Anlagen mit den gleichen Anforderungsmerkmalen unterschiedliche Effizienz zeigen können.

Die Suche nach einer Best-Practice-Variante erfolgt unter der Annahme, dass die für eine Maschine modellierten Anforderungen ihr Einsatzumfeld ausreichend komplett be-

⁴⁴ EDM – Engineering Data Management.

schreiben. Sind in der Datenbasis der Anlagengraphen Anlagen mit gleichen Anforderungsprofilen vorhanden, so können die Effizienzkenngößen der Anlagen verglichen werden. Findet sich eine „bessere“ Umsetzung der Anforderungen, so sollte der Umbau der bestehenden Lösung überdacht werden. Bei dieser Suche können auch vollständig andere Implementierungen gefunden werden, so dass statt eines Umbaus ein Neu-Invest erfolgen könnte.

Hinsichtlich der aufkommenden Betreibermodelle könnte ein solches Vorgehen bereits in naher Zukunft verwirklicht werden. Eine solche Digital Maintenance Workbench stellt ein zukünftiges Modul der Digitalen Fabrik dar, das wesentliche Teile des technischen Instandhaltungsmanagements unterstützen kann (Abbildung 47).

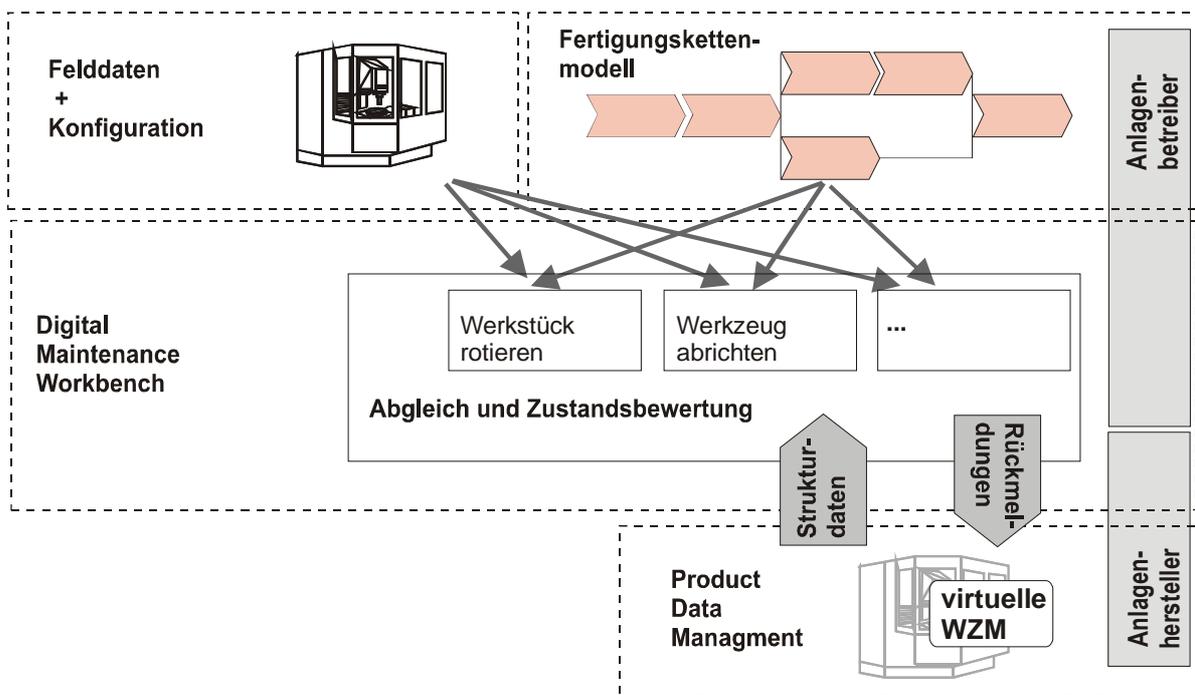


Abbildung 47 Ansatz der Digital Maintenance Workbench als neuer Ansatz für Instandhaltungsplanungssysteme

Literatur

- Adam89 Adam, S.:
Optimierung der Anlageninstandhaltung – Verfügbarkeitsanforderungen, Ausfallfolgekosten und Ausfallverhalten als Bestimmungsgrößen wirtschaftlich sinnvoller Instandhaltungsstrategien. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1989.
- Aggteleky87 Aggteleky, B.:
Fabrikplanung. Band1: Grundlagen. München: Hanser 1987.
- Ahlers00 Ahlers, H.; Günther, G.:
Advanced Condition Monitoring. 33rd MATADOR Conf., Manchester (GB), 13/14 Juli 2000.
- Anderl89 Anderl, R.:
Integriertes Produktmodell. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, Band 84 (1989) Nr. 11, S. 640-644.
- Aurich03 Aurich, J.; Hielscher, T.:
Datenbasierte Prozesssicherung auch in KMU. QZ 48 (2003), S. 1081f.
- Aurich04a Aurich, J.; Barbian, P.; Naab, C.:
Produktionsstrategie im Produktlebenszyklus. ZWF 99 (2004) 5, S.218-223.
- Aurich04b Aurich, J.; Rößing, M.; Jaime, R.:
Änderungsmanagement in der Produktion. ZWF 99 (2004) 7-8, S.381-384.
- Aurich06 Aurich, J.; Siener, M.; Hielscher, T.:
Qualitätsbasierte Instandhaltung. QZ 51(2006), S. 66f.
- Au-Yang96 Au-Yang, M. K.:
Non-intrusive Valve Diagnosis. Power Engineering 100 (1996) 1, S. 29-32.
- Awiszus99 Awiszus, B.:
Integrierte Produkt- und Prozessmodellierung umformtechnischer Planungsprozesse. Habilitation, Universität Hannover 1999.

- Ayandokun97 Ayandokun, K.; Orton, P. A.; Sherkat, N.; Thomas, P. D.:
Smart Bearings: Developing a new technique for the condition
monitoring of rotating machinery. INES'97 IEEE Intl. Conf. Intelli. Eng.
Sys. Budapest, 15.-17. September 1997.
- Bandow05 Bandow, G.; Holstein, J.:
Die grundsätzlichen Instandhaltungsstrategien.
Elektrofachkraft.de 2 (2005), Nr.6, S.10.
- Barnett94 Barnett, J. A.; Verma, T.:
Intelligent Reliability Analysis.
IEEE 10th Conf. on Artificial Intelligence for Applications,
San Antonio, USA, Mar 1-4, 1994, (1994) S.428-433.
- Bath95 Bath, U.; Jovanovic, A.; Weber, R.:
Maintenance of power stations with fuzzy data analysis. VGB-
Kraftwerkstechnik 75 (1995) 7, S.583-586.
- Baumann96 Baumann, S.; Burgwinkel, P.:
MAXIMO Maintenance Planning and Control System at the Collieries of
Ruhrkohle Bergbau AG.
Glückauf 32 (1996) 10, S. 680-685.
- Beggan99 Beggan, C.; Woulfe, M.; Young, P. Byrne, G.:
Using Acoustic Emission to Predict Surface Quality
Int. J. Adv. Manuf. Technol. 15 (1999) 10, S. 737-742.
- Benn98 Benn, W.; Dürr, H.; Dube, H.; Löbig, S.; Kunzmann, U.:
ISO 10303 (STEP) – Datenaustauschformat oder Modellierungs-basis?.
Engineering Management, Sonderheft 1997/98.
- Bertsche04 Bertesche, B.; Lechner, G.:
Zuverlässigkeit im Maschinenbau. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer
2004.
- Biedermann00 Biedermann, H.; Grill-Kiefer, G.:
Total Productive Maintenance. Ein Ansatz zur Steigerung der
Anlagenproduktivität. Zeits. wirt. Fabrikbetrieb 95 (2000) 7-8, S. 397-
402.
- Biedermann85 Biedermann, H.:
Erfolgsorientierte Instandhaltung durch Kennzahlen.
Köln: Verlag TÜV Rheinland 1985.
- Bihl90 Bihl, R.A., Elderred, W.:
Standard-based Automated Work Planning System for Job Shop
Application. Proceedings of the 12th Annual Conference on Computers
and Industrial Engineering, Orlando, 1990, S. 45-54.
- Billings84 Billings, S. A.; Gray, J.O.; Owens, D. H.:
Nonlinear Systems Design. London, GB: Peter Peregrinus, 1984.
- Binder96 Binder, E.; Egger, H.; Hummer, A.; Sander, H.; Schernthanner, J.:
Diagnose und Monitoring von elektrischen Kraftwerkskomponenten.
Elektrotechnik und Informationstechnik 113(1996) 2, S.133ff.

- Birolini97 Birolini, A.:
Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme.
Berlin, Heidelberg: Springer 1997.
- Blanchard94 Blanchard, B. :
An enhanced approach for implementing total productive maintenance in
the manufacturing environment. Logistics Spectrum 28 (1994) 4, S. 35-
41.
- Brüggemann99 Brüggemann, H.; Schimmelpfeng, K.; Seufzer, A.:
Lebenszyklusorientierte Anlagenplanung.
VDI-Z 4/97, S. 36-38.
- Brunkhorst95 Brunkhorst, U.:
Integrierte Angebots- und Auftragsplanung im Werkzeug- und
Formenbau. Dissertation, Universität Hannover 1995, zgl. Fortschritt-
Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 366.
Düsseldorf: VDI Verlag 1995.
- Buchholz05 Buchholz, A.:
Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life
Cycle Units. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005, 200 S.Zugl.: Berlin,
TU, Diss., 2005. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum
Berlin.
- Buzacott93 Buzacott, J.A.; Shanthikumar, J. G.:
Stochastic Models of Manufacturing Systems.
Englewood Cliffs (USA): Prentice Hall 1993.
- Drake95 Drake, P. R.; Jennings, A. D.; Grosvenor, R. I.; Whittleton, D.:
A Data Acquisition System for Machine Tool Condition Monitoring.
Quality and Reliability Engineering 11(1995), S. 15-26.
- Duffie01 Duffie, N.; Lee, K.; Figueroa, R.:
Influence of Achitecture and Fault Tolerance on Complexity of
Manufacturing System Control. In: Proceeding 34th Intl. CIRP Sem.
Manufac. Sys. 16-18 May 2001, Athen, GR.
- Ebner96 Ebner, C.:
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter
Verwendung von Felddaten. iwv Fortschrittsberichte 101.
Berlin: Springer 1996.
- Eichler82 Eichler, C.:
Instandhaltungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.
- Eisinger01 Eisinger, S.; Rakowsky, U.K.:
Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance – a
probalistic approach. Reliability Engineering and System Safety 71
(2001) S. 159-164.
- Ford88 N.N.: Fehlermöglichkeiten und –einflussanalyse. Instruktionsleitfaden,
Ford Motor Company, 1988.

- Gaul94 Gaul, J.:
EDV-gestützte Erfassung und Auswertung von Meßdaten am Beispiel einer Reinwasseranlage und verfahrenstechnische Überwachung der Anlagenkomponenten.
Ehningen: Expert Verlag 1994.
- Geiger94 Geiger, K.:
System zur Unterstützung der optischen Prüfung von Werkstücken durch den Vergleich von Bildern auf der Basis eines integrierten Produktmodells. Karlsruhe, Univ., Diss., 1993.
Zgl. Karlsruhe: Shaker 1994.
- Gerhards93 Gerhards, K.-R.:
Neue Technologien und schlanke Arbeitsstrukturen - Eine Herausforderung für die Mitarbeiterqualifikation in der Instandhaltung. Forum Instandhaltung, Tagung der VDI-Ges. Produktionstechnik, Bad Honnef, D, 20.-21.4.1993, (1993) S. 123ff.
- Gershwin94 Gershwin, S. B.:
Manufacturing Systems Engineering. Englewood Cliffs (USA): Prentice Hall 1994.
- Gertler98 Gertler, J. J.:
Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems.
New York (USA): Marcel Dekker, 1998.
- Grabowski93 Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.:
Integriertes Produktmodell.
DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 1993.
- Guckenbiel97 Guckenbiel, T.:
Intelligentes Diagnosesystem für prototypische Anwendungen.
Computerwoche, 24 (1997) 8, S. 72.
- Gudszend03a Gudszend, T.:
Kooperationen zwischen Anlagenbetreiber und –herstellern.
PPS Management 8 (2003) 3.
- Gudszend03b Gudszend, T.:
Ein Verfahren zur Entwicklung von Kompetenznetzwerken für die Instandhaltung von Produktionsanlagen. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2004, 179 S. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003.
- Guinat96 Guinat, E.:
Die Analyse von Schmierölen: ihr Beitrag zur Lösung von legalen Streitfragen. 10th Internat. Colloquium Tribology-Solving Friction and Wear Problems. Esslingen, 9.-11. Jan. 1996, S. 293-298.
- Gülker99 Gülker, E.; Bandow, G.; Maykuß, A.; Schnell, M.:
Was bringt die Anlagenverbesserung? Ergebnisse einer Unternehmensbefragung. Instandhaltung 25 (1999) 4, S.10ff.
- Günther99 Günther, G.; Köhrmann, C.; Niemeier, F.:
Verfügbarkeit sichern durch systematische Zustandsmodellierung. ZWF 94 (1999) 9, S. 482-485.

- Haase87 Haase, J.:
Instandhaltung flexibler automatisierter Fertigungssysteme. Chemnitz,
Techn. Univ., Diss., 1987.
- Haase91 Haase, J.; Oertl, G.; Lohse, P.:
Programmsystem zur zustandsabhängigen Instandhaltungsplanung.
Fertigungstechnik und Betrieb 41 (1991) 2, S. 88-91.
- Hackstein87 Hackstein, R.; Klein, W.:
Informationswesen in der Instandhaltung - ohne systematische
Aufgabengliederung gibt es keine effiziente Instandhaltung.
Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering. Darmstadt
36, 1987.
- Hallmann98 Hallmann, M.; Comes, P.; Studer, E.:
Steigerung der Produktivität in der Pharma-Fertigung. Boehringer
Ingelheim Pharma KG geht mit TPM Total Productive Maintenance neue
Wege. io Management Zeitschrift, Band 67 (1998) 4, S. 74-77.
- Hammer91 Hammer, A.:
Erfahrungen im Umgang mit GINA. VDI-Z 133 (1991) 5, S. 117-118.
- Hanrath94 Hanrath, G.; Weck, M.:
Abnahme spanender Werkzeugmaschinen in Form einer Fähigkeits-
untersuchung. VDI-Zeitschrift 136 (1994) 9, S. 79-83.
- Helml92 Helml, H. J.:
Ein Verfahren zur on-line Fehlererkennung und Diagnose. Berlin,
Heidelberg, u.a.: Springer 1992.
Zgl. München, Tech. Univ., Diss. 1992.
- Hilger94 Hilger, W.; Cox, M.:
Produktivitätssteigerung durch Information. Produktionsautomatisierung
(1994) 5+6, S. 39-42.
- Hipkin97 Hipkin, I.:
The implementation of information systems for maintenance
management. Intl. Jour. Prod. Res., 35 (1997) 9, S. 2429-2444.
- Hutchinson97 Hutchinson, L. K.:
Maintenance optimization boosts productivity. In Tech 44 (1997) 11, S.
50ff.
- Iglesias97 Iglesias, J.:
Automatisierungstechnische Praxis (1997) 11, S. 73-75.
- Isermann91 Isermann, R.:
Fehlerdiagnose an Werkzeugmaschinen mittels Parameterschätz-
methoden. wt – Werkstattstechnik 8 (1991), S. 264-268.
- Isermann94 Isermann, R. (Hrsg):
Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden zur
Prozessüberwachung. VDI-Bericht 1451. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- Kaiser95 Kaiser, O.; Bender, K.:
Simultaneous Engineering durch Maschinenemulation.
CIM Management 11 (1995) 4, S.14-18

- Karpuschewski01 Karpuschewski, B.:
Sensoren zur Prozessüberwachung beim Spanen. Habilitationsschrift, Universität Hannover, 2001.
- Kaschube97 Kaschube, K.:
Kostenkiller Überwachung – Was moderne Analysesysteme zur Früherkennung von Schäden bringen.
Instandhaltung 25 (1997) 1, S.18ff.
- Kececioglu95 Kececioglu, D.:
Maintainability, Availability & Operational Readiness Engineering. Upper Saddle River (NJ, USA): Prentice Hall, 1995.
- Klemme-Wolf98 Klemme-Wolf, H.:
Schnittstellen integrieren – Grundlage einer vorbeugenden, vorausschauenden Instandhaltung.
Instandhaltung 25 (1998) 5, S. 10ff.
- Köhrmann00 Köhrmann, C.:
Modellbasierte Verfügbarkeitsanalyse automatischer Montagelinien. Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 2, Fertigungstechnik 538. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- Krause96 Krause, F. L.; Stephan, M.:
Fehlersensitive Produktgestaltung. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, Band 91 (1996) Nr. 7-8, S. 330-332
- Kuhn06 Kuhn, A.; Schuh, G.; Stahl, B.:
Nachhaltige Instandhaltung.
Frankfurt am Main: VDMA-Verlag, 2006, 81 S.
- Kuhn96 Kuhn, A.:
Prozessketten – ein Modell für die Logistik. In: Erfolgsfaktor Logistikqualität. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- Kuhn98 Kuhn, H.:
Fließproduktionssysteme: Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung. Heidelberg: Physica 1998. (Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft; Bd. 67).
- Kühnle99 Kühnle, H.; Gollos, M.:
Simultane Entwicklung und Optimierung von Produktionssystemen. Zwf 94 (1999) 10, S. 503 ff.
- Laur93 Laur, L.:
Datenbankanschluß inklusive. CIM-Praxis (1993) 6, S. 56-58.
- Lee99 Lee, J.; Wang, B.: (Hrsg.)
Computer Aided Maintenance – Methodologies and practices. Dordrecht (NL): Kluwer Academic 1999.
- Lehmann89 Lehmann, C.:
Wissensbasierte Unterstützung von Konstruktionsprozessen. München, Wien: Hanser 1989.
- LemkeEichler98 Lemke, E.; Eichler, C.:
Integrierte Instandhaltung. Landsberg: ecomed, 1998.

- LopezCortez96 Lopez Cortéz, J.:
Erschließung und hierarchische Strukturierung von Wissen über komplexe technische Systeme für den Einsatz in modellbasierten Diagnosesystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. Zugl.: Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 1996.
- Löschner93 Löschner, J.; Menzel, U.:
Künstliche Intelligenz – Ein Handwörterbuch. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- Lülf99 Lülf, G.; Wapler, H.-K.:
Maschinenüberwachung als Werkzeug der modernen Instandhaltung – Aufwand und Nutzen für den betrieblichen Alltag. Stahl und Eisen 119 (1999) 6/7, S. 141ff.
- Männel68 Männel, W.:
Wirtschaftlichkeitsfragen der Anlageninstandhaltung. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag 1968.
- Martorell99 Martorell, S.; Sanchez, A.; Serradell, V.:
Age dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions.
Reliability Engineering and System Safety 64 (1999), S.19ff.
- Masan99 Masan, G.; Hustedt, P.:
Management of Maintenance Methods by Value-added Chains. 5th Int. Conf. Manufacturing Technology, Beijing (China) 31.10.-3.11.1999.
- Maßberg91 Maßberg, W.; Seifert, H.-J.:
Fehlersuche in komplexen Produktionsanlagen.
VDI-Z 133 (1991) 12, S. 50ff.
- Mazikowski01 Mazikowski, R.:
Fuzzybasierte Produktkonfiguration in der Druckweiterverarbeitung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Fertigungstechnik Nr. 570. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- Middendorf04 Middendorf, A.; Buchholz, A.; Hefer, J., Reichl, H.; Schrank, K.; Seliger, G.:
Life Cycle Information Units for Monitoring and Identification of Product Use Conditions. Proceedings Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering. Berlin, 29. September – 1. Oktober 2004, S. 91-95.
- Möhring03 Möhring, H. C.:
Lebensdauererhöhung durch Anpassung.
phi-Produktionstechnik Hannover informiert 2/2003.
- Moubray97 Moubray, J.:
Reliability-Centered Maintenance. 2nd Edt.
Oxford: Butterworth-Heinemann 1997.

- Müller94 Müller, M.:
Rechnerunterstützung für die Durchführung prozeßorientierter FMEA. In: Qualität –eine Unternehmensstrategie. VDW, Frankfurt, 1994. (Sonderpublikation zur METAV '94).
- Nakajima88 Nakajima, S.:
Introduction to TPM – Total Productive Maintenance. Cambridge (MA),USA: Productivity Press 1988.
- Nedeß93 Nedeß, C.; Nickel, J.:
FMEA wissensbasiert erstellen. QZ 93 (1993) 12, S.689-693.
- Neumann97 Neumann, U.:
Zustandsbezogene Instandhaltungsplanung : Abschlussbericht zum DFG-Projekt (DFG Br 1303/1-2). Dortmund: Univ., Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung 1997.
- Niemeier01 Niemeier, F.:
Prozesszustandsorientierte Verfügbarkeitslenkung von Produktionsanlagen. Hannover: Universität, Diss. 2001.
- Niestadtkötter01 Niestadtkötter, J.:
Methodik zur ganzheitlichen Dokumenten- und Datenstrukturierung im Lebenslauf komplexer Werkzeugmaschinen. Stuttgart, Univ., Inst. f. Industr. Fert., Diss., 2001.
- Nowak01 Nowak, G.
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen. München: Utz, 2001. Zugl.: Diss. TU München, 2001.
- Pätzold91 Pätzold, B.:
Integration rechnerunterstützter Verfahren für die Konstruktion auf der Basis einer objektorientierten Produktmodells. Düsseldorf: Fortschrittsbereiche VDI, Reihe 20, Nr. 53, 1991.
- Perlewitz99 Perlewitz, U.:
Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von Produktionseinrichtungen. Berlin: Univ. (FhG-IPK), Diss. 1999.
- Pfeifer93 Pfeifer, T.; Zenner, T.:
Rechnergestützte, wissensbasierte Durchführung von FMEA. QZ 38 (1993) 2, S.80
- Pitter99 Pitter, F.; Thomas, J.; Feldmann, K.; Ryssel, H.:
Mikrosystem zur automatisierten Werkzeugüberwachung in Drehmaschinen über Erfassung von Vibration, Kraft und Temperatur. tm – Technisches Messen 66 (1999) 5, S. 191-202.
- Pujadas96 Pujadas, W.; Chen, F.F.:
A reliability centered maintenance strategy for a discrete part manufacturing facility. Proc. 19th Int. Conf. Computers and Industrial Engineering, 4-6 March 1996, Miami, FL, USA.
- Rabe93 Rabe, J.:
Einfluß der Maschinenfähigkeit auf die Produktqualität. Kunststoffe 83 (1993) 4, S. 291-295.

- Rast91 Rast, E.; Kühnast, K.:
Gestaltung eines modularen komplexen Hard- und Softwaresystems für die rechnerunterstützte Instandhaltung. *Fertigungstechnik und Betrieb* 41 (1991) 7, S. 412-415.
- Redeker98 Redeker, G.; Niemeier, F.:
Prozeßzustandsorientiert instand halten. Objektorientierte Prozeßzustandslenkung zur Verfügbarkeitssicherung von Produktionsanlagen. *ZwF* 93 (1998) 4, S. 117-119.
- Regel82 Regel, U.:
Technische Diagnostik an Kupplung und Bremsen von Umformmaschinen. Karl-Marx-Stadt, Techn. Hochsch., Diss, 1982.
- Renfrey95 Renfrey, D.:
Total valve management - the key to better process plant operations. *Sensor Review* 15 (1995) 4, S. 25-27.
- Riesbeck89 Riesbeck, C. K.; Schank, R. C.:
Inside Case-based Reasoning. Northwest University of Illinois. Evanston (IL, USA): Lawrence Erlbaum Publishers 1989.
- Ritz99 Ritz, P.:
Bewertung technischer Änderungen im Werkzeugbau. Aachen, RWTH, Diss. 1999. Zgl. Aachen: Shaker 1999.
- Röhrich98 Röhrich, T.; Gwinner, R.; Welfonder, E.:
GMA-Kongress 98. VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.
- Rosemann84 Rosemann, H.:
Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bei zeitabhängigen Ausfallraten. *Konstruktion* (1984) 9, S. 347-352.
- Roskam99 Roskam, R.:
In-Prozess-Überwachung von Pressen der Blechverarbeitung. Hannover, Univ., Diss 1999.
- Rudolph99 Rudolph, M.:
Modellbasierte Maschinenüberwachung schnelllaufender Pressen. In: Wiendahl, H.P.; Röhrig, M. (Hrsg.): *Industriekolloquium Verfügbarkeit*. Hannover, Univ., Inst. f. Fabrikanlagen, 1999.
- Runde04 Runde, C.:
Virtual Reality und Digitale Fabrik im Werkzeugmaschinenbau. *VDI-Z integrierte Produktion* 146 (2004), Nr.11/12, S.80-82.
- Ruppert02 Ruppert, H.:
CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung. Stuttgart U, Diss. 2002.
- Schaich01 Schaich, C.:
Informationsmodell zur fachübergreifenden Beschreibung intelligenter Produktionsmaschinen. München: Utz, 2001. Zugl.: Diss. TU München, 2001.

- Schimmelpfeng97 Schimmelpfeng, K.; Köhrmann, C.:
Anwendung der Nutzwertanalyse im Bereich von
Investitionsentscheidungen für Produktionssysteme unter besonderer
Berücksichtigung der Verfügbarkeitssicherung.
Zeitsch. f. Planung (ZP) 4/97, S. 395-406.
- Schmidt91 Schmidt, J.; Minges, R.; Asteriades, N.; Müller, A.:
FMEA - Eine Chance auch für den Mittelstand.
QZ 36 (1991) 1, S. 27-30.
- Schneider88 Schneider, H. J.:
Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten
Produktionsanlagen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik. Karlsruhe, Univ.,
Diss., 1988.
- Schneider90 Schneider, H. J.:
Vermeidung von Systemausfällen und Sicherung der Produktqualität
durch Fehlerfrühd Diagnose. at – Automatisierungstechnik 38 (1990) 10,
S. 377-383.
- Schönherr92 Schönherr, H.:
Integrierte Diagnose von Produktionszellen. iwv-Forschungsbericht Nr.
45. Berlin, Heidelberg, u.a.: Springer 1992.
- Schosee84 Schosee, R.:
Ermittlung von Instandhaltungsstrategien für Werkzeugmaschinen durch
Optimierung mit mehrfacher Zielsetzung. Dissertation Technische
Universität Chemnitz, 1984.
- Schrüfer99 Schrüfer, M.:
Stanz- und Umformautomaten lassen sich wirtschaftlich überholen.
Maschinenmarkt 105 (1999) 46, S. 40ff.
- Schulz-Kratzenberg92 Schulz-Kratzenberg, S.:
Instandhalten mit System. Fabrik 42 (1992) 11, S. 498-500.
- Schunke90 Schunke, A.:
Ähnlichkeitsuche für die Rechnerunterstützte Konstruktion. Dissertation,
Universität Hannover 1990, zgl. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr.
22. Düsseldorf: VDI Verlag 1990.
- Schwuchow98 Schwuchow, S.:
Objektbasierter Entwurf von automatisierten Fertigungssystemen mit
hierarchischen Petri-Netzen. Ilmenau: ISLE, 1999. Zgl.: Ilmenau, Tench.
Univ., Diss., 1998.
- Sedgewick92 Sedgewick, R.:
Algorithmen. Bonn, München (u.a.): Addison-Wesley 1992.
- Seibold94 Seibold, W.:
Simulation, Risikoanalyse und Diagnose mit modellbasierten Systemen.
Praxisbeispiel aus dem Maschinen- und Anlagenbau.
CAT '94, Computer Aided Technol., 10. Int. Fachmesse mit
Anwenderkongress und QUALITY '94, Quality Syst. Technol., 5. Int.
Fachmesse u. Kongress. Stuttgart: 17.-20. Mai, 1994.

- Seufzer01 Seufzer, A.:
Durchgängige Unterstützung von Instandsetzungsprozessen. Hannover:
Diss. Universität Hannover 2001.
- SFB384-99 Diskussionsrunden auf dem Industriekolloquium Verfügbarkeit. SFB384,
Univ. Hannover, Institut für Fabrikanlagen, 12.10.1999.
- Shah88 Shah, J. J.:
Feature transformations between application-specific feature spaces.
Computer-Aided Eng. J., December, 1988, S. 247-255.
- Spring91 Spring, F. A.:
The C_{pm} index - An alternate measure of process capability.
Quality Progress 24 (1991) 2, S. 57-61.
- Stark91 Stark, R.:
SPC für die Praxis. Teil 1: Kritik an der klassischen SPC-Lehre und
Forderungen an eine praxisgerechte Methode.
QZ 36 (1991) 2, S. 87-89.
- StatJahrb89 Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1989.
Statistisches Bundesamt.
- StatJahrb97 Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1997.
Statistisches Bundesamt.
- Steffens04 Steffens, K.; Wilhelm, H.:
Werkstoffe, Oberflächentechnik und Fertigungsverfahren für die nächste
Generation von Flugtriebwerken. Firmenschrift: MTU Aero Engines,
München. www.mtu.de, Stand 9/2004.
- Steger94 Steger, W. F. X.:
Wissensbasiertes Selbstheilungs- und Diagnosesystem fuer CNC-
Koordinatenmessgeraete. IPA-IAO Forschung und Praxis 192. Berlin,
Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- Storr98 Storr, A.; Litto, M.:
Verarbeitung von Erfahrungswerten aus der Störungsbewältigung zur
Erhaltung der Maschinenverfügbarkeit. Konferenz-Einzelbericht: Techn.
Diagnostik. Meersburg, 22-23.10.1998, S. 91ff.
- Sturm96 Sturm, A.:
Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung. Essen: Verlag
VGB-Kraftwerkstechnik 1996.
- Taguchi89 Taguchi, G.; Elsayed, E.A.; Hsiang, T.C.:
Quality Engineering in Production. New York: McGraw-Hill, 1989.
- Takata99 Takata, S. et. al.:
Maintenance Data Management System. Annals CIRP Vol.48/1/1999.
Bern, Stuttgart: Hallwag 1999.
- Tomaszunas98 Tomaszunas, J. J.:
Komponentenbasierte Maschinenmodellierung zur Echtzeit-Simulation
für den Steuerungstest. München: Utz Wissenschaft, 1998. Zgl.
München, Techn. Univ., Diss. 1998.

- Tomizuka85 Tomizuka, M.:
Modelling and Identification of Mechanical Systems with Nonlinearities.
IFAC – Identif. Sys. Param. Estimation, York, GB, 1985.
- Tönshoff93 Tönshoff, H. K.; Kreuzfeldt, J.; Hofschneider, D.:
Concurrent Process Planning and Workshop Control in Batch
Production. In: Proceedings of CIRP International Seminar on
Manufacturing Systems, Band 22 (1993) Nr. 3, S. 231-24.
- Tönshoff95 Tönshoff, H. K.:
Werkzeugmaschinen: Grundlagen. Berlin; Heidelberg: Springer, 1995.
- Tönshoff97a Tönshoff, H. K.; Günther, G.:
Fortgeschrittene Methoden der Zustandsüberwachung. wt 7-8 (1997), S.
373-376.
- Tönshoff97b Tönshoff, H.K.; Machens-Killig, M.; Schmidt, B.C., Mazikowski, R.:
Technische Leitstände für kleine und mittlere Unternehmen.
ZwF 92 (1997) 10, S. 511-513.
- Tönshoff98 Tönshoff, H. K.; Seufzer, A.:
Simultaneous Planning of Maintenance Tasks. Annals German Acad.
Soc. Prod. Eng. 8 (1998), S. 103-106.
- Tönshoff99 Tönshoff, H. K.; Masan, G.:
Management of Instand Processes in the Shopfloor. 5th Int. Conf. Adv.
Manuf. Sys. a. Techn. Udine (Italy), June 3-4, 1999.
- Torvinen96 Torvinen, S., Milne, R.:
Increasing the availability of FMS with multimedia-supported diagnostic
expert systems. J. Intelli. Manuf. 7 (1996) 5, S. 399-404.
- Troppens02 Troppens, D.:
Zustandsbestimmung in allen Phasen des Lebenszyklusses von
Maschinen und Anlagen zur Senkung der Life-Cycle-Costs.
VITW-Instandhaltungskongress : Dresden, 5./6.11.2002.
- VDW92 Weck, M.; Stave, H.; Bonse, R.;
Abnahmebedingungen an Werkzeugmaschinen – Bestandsaufnahme
und Problemanalyse. VDW-Forschungsbericht 0157, März 1992.
- Veil99 Veil, A.:
Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-
Konstruktionsprozeß. Inst. f. Maschinenelemente, Universität Stuttgart.
Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 1999.
- vHouten00 van Houten, F.J.A.M.:
Annals of the CIRP 2000.
- vHouten01 van Houten, F.J.A.M.:
Pers. Gespräch auf CIRP Sem. Manu. Systems, Athens, GR, 2001.
- virtWZM01 Seminar „Virtuelle Werkzeugmaschine“. München, Techn. Univ, Inst. f.
Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaft (iwb),
5.Februar 2001.

- Wager04 Wagner, T.:
Neues Konzept für die Schleifbearbeitung von Turbinenschaufeln.
Firmenschrift: MTU Aero Engines, München. www.mtu.de, Stand
9/2004.
- Wani99 Wani, M. F.; Gandhi, M. P.:
Development of maintainability index for mechanical systems.
Reliability Engineering and System Safety 65 (1999), S. 19ff.
- Warnecke92 Warnecke, H.-J. (Hrsg.):
Handbuch Instandhaltung. Band 1 – Instandhaltungsmanagement. Köln:
Verlag TÜV Rheinland 1992.
- Weber90 Weber, H.; Meyer, W.:
Prozeßdiagnose durch Analyse von Schallemissionen. zwf – Zeits. f.
wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) 9, S. 473-476.
- Weck92 Weck, M.:
Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. Bd. 4: Meßtechnische
Untersuchung und Beurteilung. 4. Auflage.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- Weck98 Weck, M.; Klocke, F.; Klaever, M.; Wenk, C.; Rehse, M.; Gose, H.:
Steuerungsintegrierte Überwachung von Fertigungsprozessen.
vdi-Z 140 (1998) 6, S. 53-57.
- Werner90 Werner, G.W.; Henze, W.; Hartig, S.:
Rationalisierung der technologischen Planung und Arbeitsvorbereitung
in der Instandhaltung mit MARIS II. Fertigungstechnik und Betrieb 40
(1990) 3, S. 153-156.
- Weß92 Weß, S.:
Fallbasiertes Schließen in Deutschland – Eine Übersicht.
Künstliche Intelligenz 4 (1992).
- Wiendahl98 Wiendahl, H. P.; Köhrmann, C.:
Integrated Data Capturing and Processing - a Basis of Continuous
Improvement of Complex Assembly Systems. Annals of the German
Academic Society for Production Engineering, Volume V/2 (1998), S. 77-
80.
- Wiendahl99 Wiendahl, H. P.; Bürkner, S.; Lorenz, B.:
Schwachstellenanalyse an hochautomatisierten Anlage – der Mensch ist
nicht ersetzbar.
Industrie Management 15(1999) 2, S.22-25.
- Wincheringer96 Wincheringer, W.:
Ein Verfahren zur reportbasierten Diagnose von technischen
Maschinenstörungen in der Instandhaltung. IPA-IAO Forschung und
Praxis Bd. 239. Stuttgart, Berlin: Springer 1996.
- Wirth93 Wirth, R.:
Wissensbasierte Unterstützung der FMEA. In: Forsch. Ber. Inst.
anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW), Ulm, Dezember
1993.

- Wirth99 Wirth, R.:
Maschinendiagnose an Industriegetrieben. Teil 1: Grundlagen der
Analyserverfahren. Antriebstechnik 37 (1999) 10, S. 75-80.
- Wolf70 Wolf, M.:
Instandhaltungspolitiken in einfachen Systemen.
Berlin, Heidelberg: Springer 1970.
- Wolfram99 Wolfram, A.; Brune, T.:
Komponentenbasierter Teleservice am Beispiel von Asynchronmotoren
und Megnetventilen. Industrielle Automation und Internet, Langen, 8-
9.Nov. 1999. Zgl. VDI-Berichte 1515 (1999) S. 219-228.
- Xu03 Xu, L.:
Wiederverwendbare Modelle zur Maschinensimulation für den
Steuerungstest. München: Utz, 2003. Zugl.: Diss. TU München, 2003.
- Zöllner92 Zöllner, B.:
Der Schlüssel zu 'Quick Response' - Integrierte Betriebsdatenerfassung.
Bekleidung und Wäsche, Bekleidung und Maschenware 44 (1992) 4, S.
64-66.
- Zöllner95 Zöllner, B.:
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion. München: Hanser 1995.
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995.
- Zülch01 Zülch, G.; Vollstedt, T.; Plag, R.:
Abnutzungszustände durch Simulation ermitteln.
QZ 46 (2001) 2, S. 154-155.

Richtlinien und Normen

DIN 25419	Ereignisablaufanalyse: Verfahren, graphische Symbole und Auswertung
DIN 25424-1	Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen
DIN 25424-2	Fehlerbaumanalyse: Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes
DIN 25448	Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse)
DIN 31051	Grundlagen der Instandhaltung. (Alter Titel: Instandhaltung: Begriffe und Maßnahmen. 4/1982)
DIN 31054	Grundsätze zur Festlegung von Zeiten und zum Aufbau von Zeitsystemen
DIN 40041	Zuverlässigkeit: Begriffe
DIN 40150	Begriffe zur Ordnung von Funktions- und Baueinheiten
VDI 2888	Zustandsorientierte Instandhaltung
VDI 2893	Bildung von Kennzahlen für die Instandhaltung
VDI 2896	Instandhaltungscontrolling innerhalb der Anlagenwirtschaft
VDI 4004	Blatt 1,2: Zuverlässigkeitskenngrößen Blatt 3: Kenngrößen der Instandhaltbarkeit Blatt 4: Verfügbarkeitskenngrößen
VDI 4008-2	Technische Regel: Boolesches Modell
VDI 4008-5	Technische Regel: Petri-Netz

Normenreihen

ISO 10303	Normenreihe STEP
DIN IEC 61508	Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Entwurf 2006. Basiert u.a auf MIL-STD 1629A, 80/ MIL-STD-1629 A, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Critically Analysis, 1980

Anhang

A1 Vereinfachtes Zeitmodell

Im Szenario wird ein vereinfachtes Zeitmodell verwendet. Dieses besteht aus durchnummerierten Betriebskalendertagen (BKT), an denen im Dreischichtbetrieb gearbeitet wird. Die ersten zwei Ziffern bezeichnen den Tag, die dritte Ziffer die Schicht:

Beispiel: Darstellung der Betriebskalendertage 1 und 2:

011; 012; 013; 021; 022; 023; ...

Ein solches Zeitmodell vereinfacht Berechnungen. Für die Praxis kann sich die Einteilung in Schichten als zu grob erweisen, hier wäre eine Teilung in Einheiten von 2h angeraten.

A2 Zusammenfassung Felddaten im Beispielszenario

Zahlen verweisen auf die entsprechenden Dekompositionsobjekte im Anlagengraphen (Anhang A4)

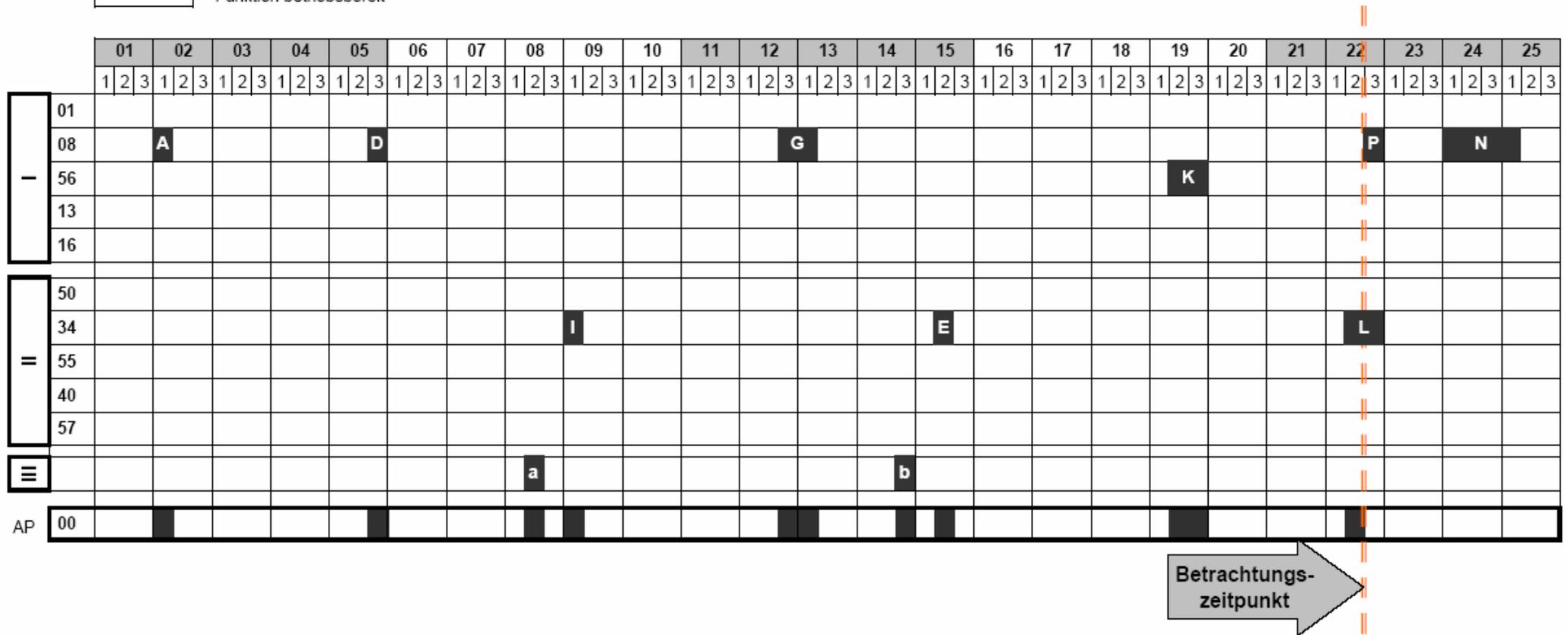
Felddaten						Propagation	
Nr.	Beschreibung	Quellsystem	Bezug	Zeitpunkt	Störung der Fertigung	Bezug ist Funktion oder Komponente	propagiert auf
1	Neue Kühlmittelpumpen in Betrieb nehmen	IPS	49	022	j	F	40
2	X-Achse wandert	IPS	04	032		F	08
3	Tisch hat Spiel	IPS	16	141		F	08
5	1 Stck A456122608 /Geometriefehler Profil	QM	26	082	j	K	08
6	Auf Endschalter u. Lüfter CNC def. wechseln	OÜ	58	152	j	F	34
7	Vorschlagswesen: Standard-Magnetplatten verwenden	TPM	04	011		K	08
8	Spindel getauscht	IPS	41	131	j	K	56
9	4 Stck. A456122609 Geometriefehler Profil	QM	06	143		F	08
10	Maschine undicht	TPM	09	103		K	16
11	CD-Abrichten – Berechnung falsch	IPS	07	091	j	F	08
12	Brand auf Werkstücken	IPS	48	172		F	08
13	Einrollgerät defekt	OÜ	35	192	j	F	56
14	Kabelschlepp Y-Achse schwer zugänglich -> für schnellere Reparatur einen aufklappbaren Kabelschlepp einbauen	TPM	29	102		K	08

A3 Zusammenfassung Anliegen im Beispielszenario

Anliegen											Transformation	
Nr	Maßnahme	ggf. Auslöser [Felddatum- Nr]	Felddatum Nr.	Maßnahme begonnen	lfd. Phase	Schluss ab	Maßnahme abgeschlossen und bestätigt	Zielkosten	Istkosten	Erzeugt Variation an ...	Erzeugt Variante von ...	
A		Neue Kühlmittelpumpen in Betrieb	1	022	5	022	023		1128		41	
B	Entstörauftrag	X-Achse wandert	2	032	5		033		1415	04		
C	Entstörauftrag	Tisch hat Spiel	3	142	5		143	500	485			
D	BGV.A2 Prüfung durchführen		4	053	5	053	061		480	16		
[a]		Q-Fehler	5		5	082				26		
E	Entstörauftrag	Auf Endschalter u. Lüfter CNC def.	6	152	5	152	153	2500	2650	03		
F	Standard-Magnetplatten installieren	Vorschlagswesen: Standard-Magnetplatten	7	053	5		061		3280		49	
G		Spindel getauscht	8	132	5	132	141		530	49		
[b]		Q-Fehler	9		5	143						
H	Dichtigkeitsprüfung	Maschine undicht	10	152	3		160	1000	280	35		
I	Entstörauftrag	CD-Abrichten – Berechnung falsch	11	091	5	091	092		743	07		
J		Brand auf Werkstücken	12	172	5		173		576	48		
K	Entstörauftrag	Einrollgerät defekt	10	192	5	192	201		2966	09		
L	Kabelsatz mit Steckern versehen		14	222	4	222		2500			29	
M	Kühlmitteldurchsatz 500->800 l/h	X-Achse: Rollenkäfig und Maßstab verschmutzt		241	2	241		15000	0	56		
N	Neues Messsystem: induktiv			241	2	241		15000			26	
O	Aufbau Be/Entladestation	Be/Entladestation fehlt			1						03	
P	Entstörauftrag	Abrichtgerät defekt		223	3	223				35		
Q	Prüfung Kostenpotentiale	Periodenende > 5%			1			-3780		00		

A5 Graphische Darstellung Verlauf Effektivitätsfunktion

A Funktion nicht betriebsbereit, Buchstabe verweist auf Anliegen
 Funktion betriebsbereit



- Block I - Anforderungsfunktionen
- Block II - Querschnittsfunktionen
- Block III - Summe Arbeitsplatz