



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Bayessches Netzwerk für eine vorausschauende Instandhaltung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

und mit der Unterstützung der fachlichen Betreuer

**Univ.-Ass. Dr.-Ing. Fazel Ansari**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

**Dipl.-Ing. Tanja Nemeth**

(Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Ralf Pühringer**

1226075 (E 066.482)

Mariahilfer Gürtel 37/13

1150 Wien

Wien, im April 2018

---

Ralf Pühringer



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im April 2018

---

Ralf Pühringer

## Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei meinen Betreuern der Diplomarbeit.

Frau Dipl.-Ing. Tanja Nemeth hat sowohl den Kontakt zwischen mir und den weiteren Betreuern hergestellt, als auch Ihre volle Unterstützung während der Bearbeitung des Themas gewährleistet. Danke für die Erklärung der Daten, die die Grundlage des praktischen Teils dieser Arbeit bilden.

Herr Univ.-Ass. Dr.-Ing. Fazel Ansari betreute mich während der gesamten Zeit als Methodenexperte und stand in zahlreichen Meetings mit Ratschlägen und Erklärungen bereit. Ohne die tatkräftige Unterstützung wäre das Verfassen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Dafür gebührt Ihnen ein großer Dank.

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn bewilligte die Arbeit nach der Verfassung des Exposés. Dafür bedanke ich mich.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei jenem Unternehmen, dass die Daten und den zugrundeliegenden Prozess für den praktischen Teil der Diplomarbeit zur Verfügung gestellt hat.

## Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Modell für die wahrscheinlichkeitsbasierte Ereigniserkennung und -analyse im Instandhaltungsmanagement unter Verwendung von Bayesschen Netzwerken (BN) zu entwickeln.

Damit ein reibungsloser Einstieg in die Arbeit gewährleistet ist, werden mittels einer Literaturrecherche die Grundzüge der Instandhaltung zusammengefasst. Anschließend wird das Thema der Key Performance Indicator behandelt, indem diese nicht nur theoretisch erklärt werden, sondern auch deren Berechnung genauestens erläutert wird. Diese wird für die spätere Modellbildung benötigt. Im Anschluss wird das Thema BN näher beleuchtet. Dabei werden zu Beginn die Grundlagen beschrieben, um in weiterer Folge den derzeitigen Stand der Technik von BN darzulegen, damit die derzeitigen Grenzen der Anwendung dieser Netzwerke aufgezeigt werden. Die praktischen Anwendungen von BN in Bezug auf Produktion bzw. Instandhaltung finden sich ebenso wie der Stand der Technik in einer SWOT-Analyse wieder, welche die derzeitigen Möglichkeiten in diesem Bereich zusammenfasst.

Für die Eignungsüberprüfung eines BN zum Thema vorausschauende Instandhaltung werden Daten eines Produktionsprozesses herangezogen, die mit der Hilfe von Datenanalyse und Evaluierung entsprechend aufbereitet werden. Auf dieser Datengrundlage soll ein BN in zwei verschiedenen Vorgängen modelliert werden. Eine manuelle Modellierung durch den Anwender erstellt ein BN, das in weiterer Folge zu einem dynamischen BN erweitert wird. Außerdem wird mit Softwarehilfe ein BN automatisch erstellt. Zu guter Letzt gilt es die manuelle und die automatische Modellierung miteinander zu vergleichen und die Vorzüge der einzelnen Herangehensweisen hervorzuheben.

## **Abstract**

The aim of this thesis is to develop a model for probability-based event detection and analysis in maintenance management using Bayesian Networks (BN).

To ensure a smooth start to the work, the basics of maintenance are summarized by means of a literature research. Subsequently, the topic of Key Performance Indicator is treated by not only explaining it theoretically, but also explaining the calculation in detail. This is needed for building the model later. Afterwards, the topic BN is highlighted. In the beginning, the basics are described to explain the current state of the art of BN for showing the current limits of the application of these networks. The practical applications of BN in terms of production and maintenance, as well as the state of the art, are reflected in a SWOT analysis, which summarizes the current possibilities in this field.

For the suitability check of a BN on the topic of predictive maintenance, data from a production process is used, which are prepared with the help of data analysis and evaluation. Based on the data, a BN is modeled in two different processes. A manual modeling by the user creates a BN, which is subsequently extended to a dynamic BN. In addition, software helps to create a BN automatically. Finally, a comparison between manual and automatic modeling highlights the advantages and disadvantages of each approach.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Problembeschreibung und Ziele .....	1
1.2	Methoden .....	2
2	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Grundlagen der Instandhaltung .....	3
2.1.1	Ziele der Instandhaltung .....	4
2.1.2	Instandhaltungsstrategien .....	5
2.2	Key Performance Indicator (KPI).....	8
2.2.1	Unterscheidung der Kennzahlen.....	8
2.2.2	Grundlagen zur Berechnung der KPIs .....	9
2.2.3	Produktivität (productivity).....	16
2.2.4	Zuverlässigkeit (reliability).....	16
2.2.5	Instandhaltbarkeit (maintainability).....	17
2.2.6	Verfügbarkeit (availability).....	18
2.2.7	Gesamtanlageneffizienz OEE (Overall Equipment Efficiency) .....	20
2.3	Bayessches Netzwerk .....	22
2.3.1	Allgemeines .....	22
2.3.2	Vorgehensweise .....	24
2.4	Stand der Technik .....	27
2.4.1	Beginn der Anwendung von BN in Bezug auf Instandhaltung .....	27
2.4.2	Vorschreibende Instandhaltung (prescriptive maintenance) .....	28
2.4.3	Werkzeug für eine zustandsorientierte Instandhaltung .....	29
2.4.4	BN für die Messung der Lean Management-Leistung .....	31
2.4.5	Instandhaltungsentscheidung für Komponenten durch BN .....	33
2.4.6	Regeleinführung für die Echtzeit-Fehlerentdeckung vor dem Auftritt ....	34
2.4.7	Vorausschauende Instandhaltung für Mehrzustandssysteme .....	35
2.4.8	Shopfloor-Datensammlung für eine vorausschauende Instandhaltung ..	36
2.5	Anwendungen .....	37
2.5.1	Halbleiter .....	37
2.5.2	Turbine eines Kraftwerks .....	37

---

2.5.3	Kompressor .....	38
2.5.4	Schweißsteuergerät .....	38
2.5.5	Laststufenschalter .....	38
2.5.6	Zugkontrollsystem .....	39
2.5.7	Gebälse einer Limonadenproduktionslinie .....	39
2.5.8	Schneidwerkzeug einer CNC-Maschine .....	39
2.5.9	Arbeitsplätze und Shuttle .....	40
2.6	Der Produktionsprozess als Fallbeispiel.....	40
2.7	Zusammenfassung und SWOT-Analyse .....	41
3	Erstellung eines Bayesschen Netzwerkes für eine vorausschauende Instandhaltung auf KPI-Basis .....	44
3.1	Datenvorbereitung.....	46
3.1.1	Historienliste .....	46
3.1.2	Maschinen-, Fehlerzustand und Stückzahlaufzeichnung .....	47
3.1.3	Definition der Maschinen- und Fehlerzustände.....	47
3.1.4	Einführung des Primärschlüssels Zustand-ID .....	50
3.1.5	Fehlerzustandskategorien.....	51
3.1.6	Aufspaltung der Historienliste .....	52
3.2	Datenanalyse .....	53
3.2.1	Analyse der Maschinenzustände .....	53
3.2.2	Analyse der Fehlerzustände .....	56
3.2.3	Analyse der produzierten Stückzahl.....	61
3.3	Manuelles Modellieren des BN .....	62
3.3.1	Aufstellen der BN-Struktur .....	62
3.3.2	Vereinfachung der BN-Struktur .....	64
3.3.3	Bestimmung der Zustände der einzelnen Knoten .....	66
3.3.4	Die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle (CPT) .....	68
3.3.5	Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der KRIs .....	69
3.3.6	Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der RIs und PIs.....	72
3.3.7	Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der KPIs.....	93
3.3.8	Manuelle Modellierung des DBN.....	107
3.4	Automatisches Modellieren des BN.....	114

---

3.4.1	Erstellung einer neuen Datentabelle .....	116
3.4.2	Diskretisierung der kontinuierlichen Datenspalten .....	117
3.4.3	Automatische Generierung des BN durch die Tabelle „MaschFehler“ .....	119
3.4.4	Automatische Modellierung des DBN .....	122
3.5	Vergleich der beiden Modelle .....	123
3.5.1	Aufwand für die Datenaufbereitung.....	123
3.5.2	Zeitlicher Aufwand für die Modellierung .....	123
3.5.3	Komplexität des Modells .....	123
3.5.4	Genauigkeit der Ergebnisse.....	124
3.5.5	Informationsgehalt .....	124
3.5.6	Aussagekraft für das Fallbeispiel .....	124
3.5.7	Robustheit.....	124
3.5.8	Anpassungsfähigkeit.....	125
3.5.9	Vergleichsübersicht.....	125
4	Ergebnisse .....	127
4.1	Allgemeine Erkenntnis.....	127
4.2	Erkenntnisse zum Produktionsprozess.....	127
4.3	Erkenntnisse zur verwendeten Methode .....	128
4.3.1	Manuelle Modellierung des BN .....	128
4.3.2	Manuelle Modellierung des DBN.....	131
4.3.3	Automatische Modellierung des BN .....	132
4.4	Vergleich mit den vorgestellten Modellen .....	132
4.5	Ergebnisse in Bezug auf die Problemstellung .....	133
4.6	Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfrage .....	134
5	Ausblick.....	135
6	Literaturverzeichnis .....	136
7	Abbildungsverzeichnis .....	140
8	Formelverzeichnis .....	143
9	Tabellenverzeichnis .....	144
10	Abkürzungsverzeichnis.....	146

# 1 Einleitung

## 1.1 Problembeschreibung und Ziele

Damit Unternehmen wettbewerbsfähig bleiben, müssen nicht nur Effizienz und Produktivität von Produktionsprozessen weiter verbessert werden, sondern auch die Flexibilität auf Grund von veränderten Kundenwünschen oder unvorhersehbaren Ereignissen wie Umwelteinflüssen gesteigert werden. <sup>1</sup>

Eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) sorgt für die Erfüllung dieser Anforderungen, indem das Intervall zwischen den einzelnen Reparaturen maximiert und die Kosten von ungeplanten Ausfällen minimiert werden. So wird nicht nur die Produktivität gesteigert, sondern auch die Produktqualität und die Effektivität der Produktionssysteme optimiert. <sup>2</sup>

In komplexen Maschinen und Anlagen befinden sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren und Sensornetzwerken, um eine umfassende und zuverlässige Erfassung von Daten zu sichern. Die isolierte Auswertung von einzelnen Sensordaten genügt nicht mehr den Bedürfnissen der Datenanalyse. Eine Methode zur Synthese der Sensordaten stellt das BN dar. <sup>3</sup>

Die Methode in Kombination mit Key Performance Indicators (KPIs) führt zu einer neuen Herangehensweise an dieses Thema und wird bei erfolgreicher Bestätigung der Hypothese eine neue theoretische Basis für Folgeentwicklungen in diesem Bereich bieten.

Im Zuge dieser Arbeit werden Daten, die aus einem stationären (d.h. über die Zeit in seinen Arbeitsabläufen und damit in seinen Prozessschritten nicht veränderlichen) Produktionsprozess stammen, durch Datenanalyse und Evaluierung verarbeitet, um im Anschluss die Tauglichkeit eines BN im Kontext der vorausschauenden Instandhaltung zu erproben. Dafür werden BN sowohl manuell als auch automatisch erstellt und anschließend durch das Hinzufügen einer zeitlichen Komponente zu einem dynamischen Bayesschen Netzwerk (DBN) erweitert. Ein Vergleich der beiden Herangehensweisen soll die Vorzüge der beiden Varianten zum Vorschein bringen.

**Konkrete Fragestellung:** Eignet sich die Modellierung eines stationären Produktionsprozesses durch ein Bayessches Netzwerk für eine zuverlässige Vorhersage im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung mit der Hilfe von KPIs?

---

<sup>1</sup> Vgl. Dengel, A., 2012, S. 404.

<sup>2</sup> Vgl. Mobley, R. K., 2002, S. 4.

<sup>3</sup> Vgl. Cigolini, R. D. u.a., 2009, S. 52.

Aus dieser Fragestellung leiten sich die Ziele der Forschungsarbeit ab.

**Ziel 1:** Es soll ein Modell für die wahrscheinlichkeitsbasierte Ereigniserkennung und -analyse im Instandhaltungsmanagement unter Verwendung von BN entwickelt werden.

**Ziel 2:** Die manuelle Erstellung eines BN auf Grund von Daten eines praktischen Beispiels soll auf die Eignung im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung erprobt werden.

**Ziel 3:** Die automatische Erstellung eines BN auf Grund von Daten eines praktischen Beispiels soll die Eignung im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung wieder spiegeln.

**Ziel 4:** Durch das Hinzufügen einer Zeitkomponente soll aus dem BN auf Basis der Daten ein DBN gebildet werden. Dieses DBN ist in der Lage, ein System, das sich nicht im Gleichgewicht befindet, zu modellieren.

## 1.2 Methoden

In dem Kapitel theoretische Grundlagen wird durch eine Literaturrecherche das Grundwissen für die spätere praktische Anwendung eines BN geschaffen. Dabei wird zu Beginn die Thematik der BN beschrieben, um einen einfachen Einstieg in die Arbeit zu ermöglichen. Die weitere Recherche soll den derzeitigen Stand der Technik von BN widerspiegeln, um die derzeitigen Grenzen der Anwendung dieser Netzwerke aufzuzeigen. Der essentielle Teil der Literaturrecherche besteht aus der Beschreibung von praktischen Anwendungen von BN in Bezug auf Produktion bzw. Instandhaltung.

Um eine Eignung des BN für eine vorausschauende Instandhaltung zu überprüfen, werden Daten eines realen stationären Produktionsprozesses herangezogen. Diese gilt es mit Hilfe von Datenanalyse und Evaluierung entsprechend zu verarbeiten, um eine Modellierung des BN auf Basis dieses stationären Produktionsprozesses mit der Hilfe von KPIs zu ermöglichen. Die bedingte Wahrscheinlichkeitsrechnung spielt dabei eine wesentliche Rolle, da diese ein zentrales Element der BN darstellt.

Das BN soll in zwei verschiedenen Vorgängen modelliert werden. Zunächst findet ein manuelles Erstellen durch den Anwender mit Hilfe der Software GeNIe SMILE<sup>4</sup> statt. Dieses Modell gilt es als DBN zu erweitern. Im Anschluss soll GeNIe SMILE die Daten automatisch einlesen und daraus ein BN bzw. ein DBN erstellen. Ein Vergleich der beiden Methoden soll die Eigenschaften dieser hervorheben.

---

<sup>4</sup> Vgl. URL: <https://www.bayesfusion.com/>

## 2 Theoretische Grundlagen

Im theoretischen Teil wird die Basis für ein Verständnis des folgenden praktischen Teiles der Diplomarbeit geschaffen. Zunächst werden die Grundlagen der Instandhaltung und der KPI behandelt, um im Anschluss die Berechnung von instandhaltungsrelevanter KPIs zu erläutern. Das Kapitel Bayessches Netzwerk soll die verwendete Methode erläutern und den Stand der Technik bzw. die Anwendungen dieser Methode bezüglich Instandhaltung aufzeigen. Im Anschluss bildet die Erklärung des Produktionsprozesses, welcher als Fallbeispiel für den praktischen Teil dieser Arbeit dient, den Schlussteil dieses Kapitels.

### 2.1 Grundlagen der Instandhaltung

Die Instandhaltung hat für die Erhaltung der Funktion und der Leistungsfähigkeit einer Maschine bzw. Anlage Sorge zu tragen. Auf Grund der steigenden Komplexität von Produktions-, Handhabungs- und Transporteinrichtungen nimmt die Instandhaltung eine immer zentralere Rolle im täglichen Ablauf eines Produktionsunternehmens ein. Für eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Produktionsanlagen ist es nicht mehr ausreichend, nach dem Auftreten von Ausfällen zu reparieren. So müssen bereits vorbeugende Maßnahmen getroffen werden, um teure Ausfälle und Risiken für die Sicherheit und Umwelt auszuschließen.<sup>5</sup>

Die Instandhaltung wird laut DIN 31051: 2012-09 wie folgt definiert:

*„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“*

Zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes stehen der Instandhaltung vier verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, die durch DIN 31051: 2012-09 eindeutig beschrieben sind.

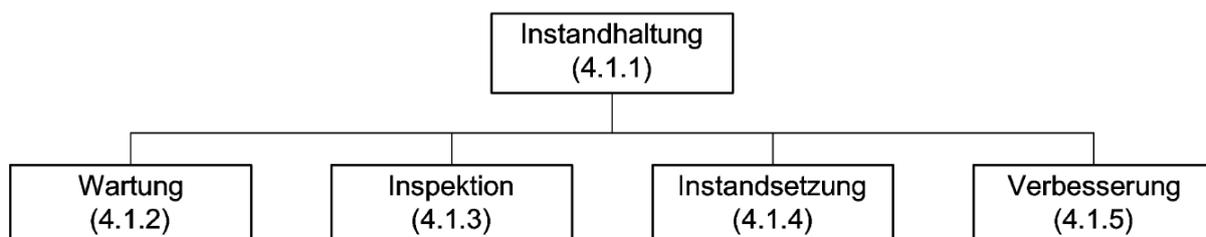


Abbildung 1: Grundmaßnahmen der Instandhaltung

<sup>5</sup> Vgl. Matyas, K., 2010, S. 27.

<b>Maßnahme</b>	<b>Definition laut DIN 31051: 2012-09</b>
Wartung	<i>„Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats“</i>
Inspektion	<i>„Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Einheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Abnutzung“</i>
Instandsetzung	<i>„physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen“</i>
Verbesserung	<i>„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit einer Einheit, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern“</i>

**Tabelle 1: Definition der Grundmaßnahmen**

### 2.1.1 Ziele der Instandhaltung

Im Produktionsbetrieb wird als Hauptziel der Instandhaltung neben der Zuverlässigkeitsmaximierung zumeist die Kostenminimierung genannt. Um die angestrebten geringsten Gesamtkosten zu erzielen, muss die Summe aus den gegenläufigen Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen und der Ausfälle minimiert werden. Diese Kosten sind abhängig von der Instandhaltungsintensität. Bei geringer Instandhaltungsintensität ergeben sich zwar geringe Kosten für die wenigen Planmaßnahmen, es werden allerdings mehr Ausfälle auftreten und dadurch höhere Kosten für die Behebung der Ursache anfallen. Eine hohe Instandhaltungsintensität führt wiederum zu hohen Kosten der Planmaßnahmen, vermeidet jedoch Ausfälle und deren Kosten weitestgehend.<sup>6</sup>

Die optimale Instandhaltungsintensität wird erreicht, wenn die Summe aus den Kosten der geplanten Maßnahmen und der Ausfälle bzw. ungeplanten Maßnahmen ein Minimum werden. Eine Kurve wie in Abbildung 2 lässt sich für die Praxis nur schwer darstellen. Die Instandhaltungskosten und die auftretenden Ausfallkosten sind zwar zumeist für eine bestimmte Instandhaltungsintensität bekannt, diese ergeben aber lediglich einen Punkt der Gesamtkostenkurve. Die Information, ob man sich links oder rechts vom Minimum der Gesamtkostenkurve befindet, fehlt.

Eine experimentelle Ermittlung der Kurven scheitert, da sich eine abgeänderte Instandhaltungsintensität zeitverzögert auf die Ausfallkosten auswirkt. Die Reduzierung der Instandhaltungsintensität birgt die Gefahr in sich, dass auf Grund der Abweichung

<sup>6</sup> Vgl. Ebenda, S. 48.

Jahre später Ausfälle resultieren. Diesem Problem kann man entgegenwirken, indem man über einen längeren Zeitraum Daten von Instandhaltungsmaßnahmen und Ausfällen erfasst und aufbereitet, um daraus entsprechende Schlüsse für eine erfolgreiche Interpretation zu ziehen.<sup>7</sup>

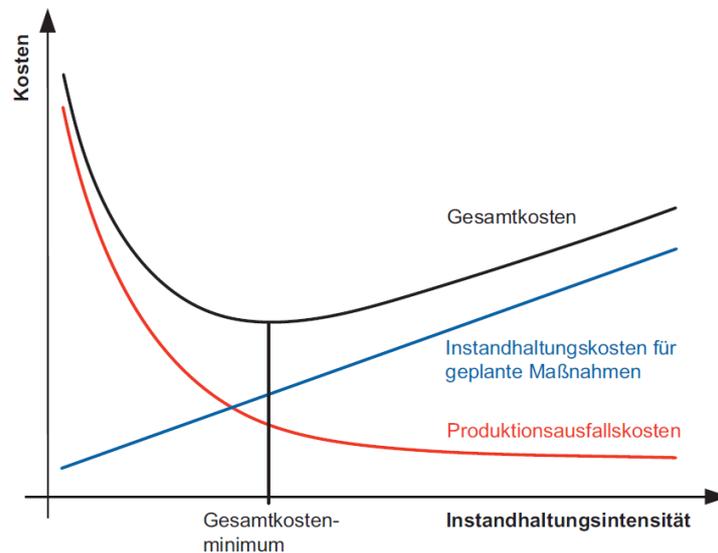


Abbildung 2: Instandhaltungskosten in Abhängigkeit der Instandhaltungsintensität<sup>8</sup>

## 2.1.2 Instandhaltungsstrategien

Laut Hodapp weist der Instandhaltungsprozess in seiner strategischen Ausrichtung ein Dreiecksverhältnis reaktiver, präventiver und zustandsorientierter Maßnahmen auf. Die reaktive Instandhaltung (geringe Instandhaltungsintensität) soll die Funktion durch Maßnahmen nach einem Ausfall wiederherstellen. Dabei werden Folgeschäden in Kauf genommen. Die präventive Instandhaltung (hohe Instandhaltungsintensität) hat sich die Werterhaltung durch vorbeugenden Austausch von verschleißanfälligen Teilen zum Ziel gesetzt. Das Problem dieser Strategie besteht darin, dass die Komponenten nicht vollständig bis zu ihrer Leistungsgrenze verwendet werden.<sup>9</sup>



Abbildung 3: Instandhaltungsstrategie im Dreiecksverhältnis<sup>10</sup>

<sup>7</sup> Vgl. Ebenda, S. 49.

<sup>8</sup> Vgl. Ebenda, S. 48.

<sup>9</sup> Vgl. Reichel, J. u.a., 2009, S. 137.

<sup>10</sup> Vgl. Ebenda, S. 137.

Um die gewünschte Anlagenzuverlässigkeit garantieren zu können, reichen oftmals die drei klassischen Instandhaltungsstrategien (Ausfallbehebung bzw. reaktive Instandhaltung, zeitgesteuerte periodische Instandhaltung bzw. präventive Instandhaltung und zustandsorientierte Instandhaltung) nicht aus, da die Instandhaltungsmaßnahmen zu falschen oder ungünstigen Zeitpunkten veranlasst werden. <sup>11</sup>

Das Modell von Matyas (Abbildung 4) beinhaltet die vorausschauende Instandhaltung (predictive maintenance) als Strategie. Ein umfassendes Instandhaltungskonzept verfolgt demnach einen optimalen Mix aus Ausfallbehebung, vorbeugender Instandhaltung, zustandsorientierter Instandhaltung und der vorausschauenden Instandhaltung. Die Wahl der geeigneten Strategie für die einzelnen Aufgaben wird über eine Analyse bestimmt, die sich die Einhaltung der geforderten Zuverlässigkeit bei minimalen Kosten zum Ziel gesetzt hat. Dabei werden unter anderem die Verkettung und Redundanz der Anlagen, Instandsetzungszeit, Ersatzteilverfügbarkeit, . . . als Kriterien herangezogen. <sup>12</sup>



Abbildung 4: Instandhaltungsstrategien <sup>13</sup>

Eine vorausschauende Instandhaltung bedeutet die regelmäßige Überwachung des tatsächlichen mechanischen Zustands, der Effizienz und andere Indikatoren für die Generierung von Daten. Diese werden benötigt, um das Intervall zwischen den Reparaturen zu maximieren und die Kosten von ungeplanten Ausfällen zu minimieren. Außerdem dient die vorausschauende Instandhaltung der Verbesserung von Produktivität, Produktqualität und Gesamteffizienz der Produktion. Sie optimiert die Verfügbarkeit von Maschinen und reduziert die Wartungskosten erheblich. <sup>14</sup>

<sup>11</sup> Vgl. Matyas, K., 2010, S. 136.

<sup>12</sup> Vgl. Ebenda, S. 120.

<sup>13</sup> Vgl. Ebenda, S. 120.

<sup>14</sup> Vgl. Mobley, R. K., 2002, S. 5.

Durch die Erfassung und Auswertung von Maschinendaten über längere Zeiträume ist es möglich, detaillierte Prognosen über das Ausfallverhalten kritischer Komponenten zu erstellen. Dadurch kann die Wartung bereits vor dem Eintreten einer Störung eingeplant werden. Die Herausforderung der vorausschauenden Instandhaltung besteht darin, zuverlässige Prognosen zu erstellen.<sup>15</sup>

Es gilt für eine Anlage die passende Instandhaltungsstrategie zu finden. Dabei sollen folgende Aspekte ihre Berücksichtigung in der Auswahl der optimalen Instandhaltungsstrategie finden:<sup>16</sup>

- Gesamtkostenminimierung (siehe Abbildung 2)
- Zuverlässigkeitsmaximierung
- Sicherheitsmaximierung
- „So viel Instandhaltung wie nötig und so wenig Instandhaltung wie möglich“
- Minimierung des Gesamtrisikos

Die Strategien für die Erreichung einer maximalen Verfügbarkeit bei minimalen Gesamtkosten mit den zuvor erwähnten Auswahlbedingungen werden in weiterer Folge mit ihren Anwendungsfeldern dargestellt:

Instandhaltungsstrategie	Wann wird sie angewendet?
Ausfallbehebung	- Bei nichtkritischen Anlagen - Wenn die Kosten um Fehler zu entdecken höher sind als die Ausfallkosten.
Zeitgesteuerte periodische Instandhaltung	- Wenn die Anlage ein gut dokumentiertes Ausfallverhalten hat. - Wenn der Zustand der Anlage nicht oder erst nach langwierigem Zerlegen erkennbar ist.
Zustandsorientierte Instandhaltung	- Wenn die Anlage zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten ausfällt. - Wenn die Möglichkeit besteht, den Zustand der Anlage zu erfassen.
Vorausschauende Instandhaltung	- Wenn die Ausfallrate für eine vorgegebene Periode weiter reduziert werden muss.

**Tabelle 2: Anwendungsfelder der einzelnen Instandhaltungsstrategien**<sup>17</sup>

<sup>15</sup> Vgl. Bauernhansl, T. u.a., 2014, S. 545.

<sup>16</sup> Vgl. Matyas, K., 2010, S. 144.

<sup>17</sup> Vgl. Ebenda, S. 158.

## 2.2 Key Performance Indicator (KPI)

Im praktischen Teil dieser Arbeit dienen KPIs als Grundlage für das Modell. In diesem Kapitel wird eine strikte Trennung der einzelnen Kennzahlenarten durchgeführt, um die Begriffe exakt verwenden zu können.

### 2.2.1 Unterscheidung der Kennzahlen

Bei der Leistungsmessung können vier verschiedene Indikatoren ermittelt werden: <sup>18</sup>

- Wichtige Ergebniskennzahlen (Key Result Indicators, KRIs) zeigen an, wie etwas gemacht wurde und können als kritischer Erfolgsfaktor gesehen werden.
- Ergebniskennzahlen (Result Indicators, RIs) zeigen an, was getan wurde.
- Leistungskennzahlen (Performance Indicators, PIs) zeigen an, was zu tun ist.
- Wichtige Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) zeigen an, was zu tun ist, um die Leistung drastisch zu steigern.

Die Schwierigkeit besteht darin, die instandhaltungsrelevanten KPIs zu finden, da oftmals ungeeignete Kennzahlen als solche verwendet werden. KPIs sind Indikatoren, die sich auf Aspekte der organisatorischen Leistung konzentrieren und entscheidend für den aktuellen und zukünftigen Erfolg der Organisation sind.

Die einzelnen Kennzahlenarten werden im folgenden Modell als Schichten dargestellt, die es zu durchbrechen gilt, um zum Kern der KPIs vordringen zu können:

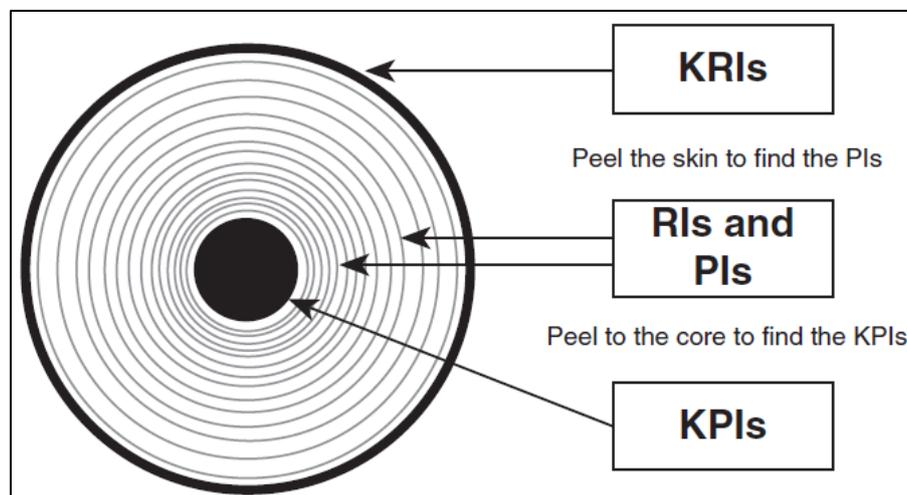


Abbildung 5: Die vier Arten der Leistungsmessung <sup>19</sup>

<sup>18</sup> Vgl. Parmenter, D., 2010, S. 1.

<sup>19</sup> Vgl. Ebenda, S. 2.

Laut Parmenter können für KPIs sieben Merkmale angeführt werden, die ihre Eigenschaften im Allgemeinen beschreiben: <sup>20</sup>

- KPIs sind nichtfinanzielle Maßnahmen (in keiner Währung ausgedrückt).
- KPIs werden häufig gemessen (z.B. 24/7, täglich oder wöchentlich).
- KPIs werden vom CEO und der Geschäftsleitung als Kontrollinstrument verwendet.
- KPIs geben klar zu verstehen, welche Maßnahmen das Personal zu setzen hat.
- KPIs ermöglichen Maßnahmen, die die Verantwortung auf ein Team übertragen.
- KPIs haben einen wesentlichen Einfluss und beeinflussen einen oder mehrere kritische Erfolgsfaktoren.
- KPIs fördern geeignete Maßnahmen.

## 2.2.2 Grundlagen zur Berechnung der KPIs

Um dem Konkurrenzdruck in der globalen Marktwirtschaft standhalten zu können, benötigen Unternehmen eine nachhaltige Produktion. Diese erfordert eine ständige Neugestaltung der Fertigungssysteme, um die erforderlichen Produktionsraten von qualitativ hochwertigen Produkten mit begrenztem Einsatz von Ressourcen gewährleisten zu können. Verfügbarkeit, Produktqualität und Produktivität bilden dabei eine zentrale Rolle und besitzen starke Beziehungen untereinander. <sup>21</sup>

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Berechnung von instandhaltungsrelevanten KPIs erläutert. Anschließend werden in den Kapiteln 2.2.3 bis 2.2.7 die Berechnungsformeln für die instandhaltungsrelevanten KPIs angeführt, die im Praxisteil für die Modellbildung herangezogen werden.

### 2.2.2.1 Zustandsvariable <sup>22</sup>

Um den Zustand einer Komponente zum Zeitpunkt  $t$  beschreiben zu können, wird eine Zustandsvariable eingeführt:

$$X_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn die Komponente zum Zeitpunkt } t \text{ funktionsfähig ist} \\ 0 & \text{wenn die Komponente zum Zeitpunkt } t \text{ einen Fehlerzustand aufweist} \end{cases}$$

**Formel 1: Definition der Zustandsvariable**

---

<sup>20</sup> Vgl. Ebenda, S. 6.

<sup>21</sup> Vgl. Colledani, M. und Tolio, T., 2012, S. 455.

<sup>22</sup> Vgl. Rausand, M. und Yland, A. H., 2004, S. 16.

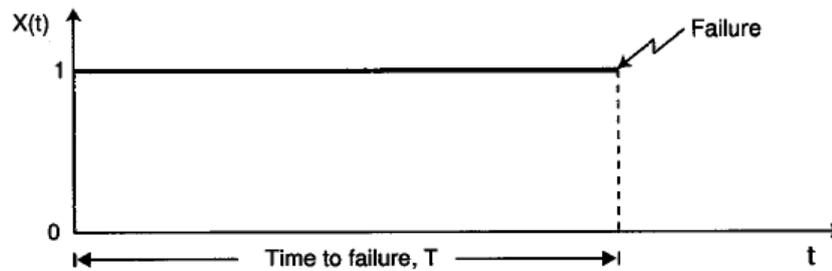


Abbildung 6: Die Zustandsvariable und Lebensdauer einer Komponente

### 2.2.2.2 Dichte-, Verteilungs- und Zuverlässigkeitsfunktion

Für eine mathematische Beschreibung wird die Lebensdauer bzw. Ausfallzeit  $T$  (siehe Abbildung 6) als kontinuierliche Zufallsvariable eingeführt. Dabei gilt die Bedingung, dass  $T \geq 0$  ist.<sup>23</sup>

Für die Analyse der Zuverlässigkeit eines Systems werden zunächst die Ausfallzeiten aufgezeichnet (Abbildung 7a). Anschließend werden Intervalle gebildet, um die Ausfallzeiten in verschiedene Klassen (Zeitbereiche) einordnen zu können (Abbildung 7b). Die Anzahl der Ausfälle pro Zeitbereich bestimmt die Balkenhöhe des Histogramms. Dabei werden die Klassen auf die horizontale Achse aufgetragen. Die vertikale Achse beschreibt die Anzahl der Ausfälle pro Klasse relativ zur Gesamtanzahl der Ausfälle (Abbildung 7c).<sup>24</sup>

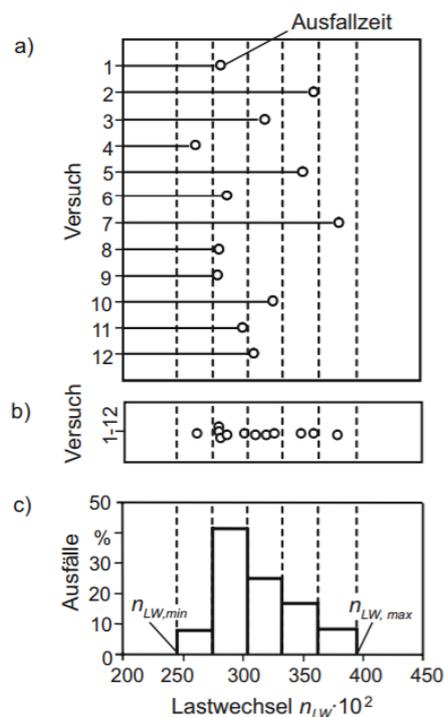


Abbildung 7: Ausfallzeiten und Histogramm der Ausfallhäufigkeiten a.) Ausfallzeiten; b.) geordnete Ausfallzeiten; c.) Histogramm der Ausfallhäufigkeiten<sup>25</sup>

<sup>23</sup> Vgl. Ebeling, Ch. E., 1997, S. 23.

<sup>24</sup> Vgl. Bertsche, B. und Lechner, G., 2004, S. 9.

<sup>25</sup> Vgl. Ebenda, S. 10.

Um aus einem Histogramm eine Dichtefunktion  $f(t)$  zu erhalten, werden die Balkenmitten im Histogramm mit Geraden verbunden. Für eine „ideale“ Dichtefunktion muss die Anzahl an aufgezeichneten Ausfallzeitpunkten  $n$  zunehmend erhöht werden. Dadurch wird es sinnvoll, die Anzahl der Klassen ebenfalls zu steigern, was zu einer Verringerung der Klassenbreite führt. Für den Grenzübergang  $n \rightarrow \infty$  nähert sich der Umriss des Histogramms einer glatten, stetigen Kurve an (Abbildung 8).<sup>26</sup>

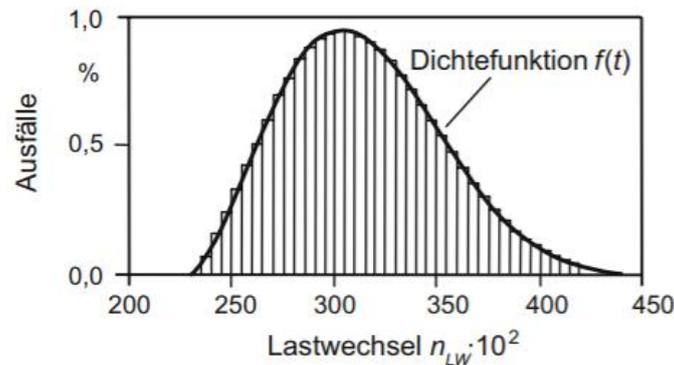


Abbildung 8: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und Dichtefunktion  $f(t)$ <sup>27</sup>

Die Verteilungsfunktion  $F(t)$  gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Komponente innerhalb des Zeitintervalls  $(0, t]$  ausfällt. Dabei werden die Ausfälle bis zum Zeitpunkt  $t$  summiert und mit der Gesamtanzahl an Ausfällen normiert.

$$F(t) = Pr(T \leq t) = \int_0^t f(u) du$$

Formel 2: Die Verteilungsfunktion  $F(t)$ <sup>28</sup>

Für die Verteilungsfunktion gelten folgende Eigenschaften:  $F(t) \geq 0$ ,  $F(0) = 0$  und  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$

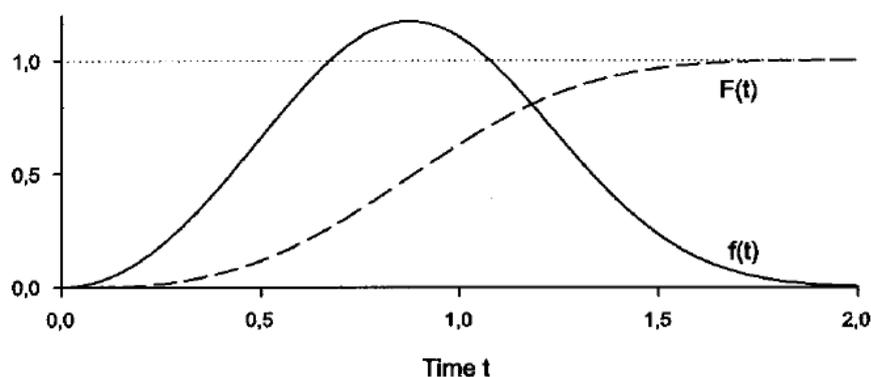


Abbildung 9: Die Verteilungsfunktion  $F(t)$  und die Dichtefunktion  $f(t)$ <sup>29</sup>

<sup>26</sup> Vgl. Ebenda, S. 12.

<sup>27</sup> Vgl. Ebenda, S. 13.

<sup>28</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 17.

<sup>29</sup> Vgl. Ebenda, S. 17.

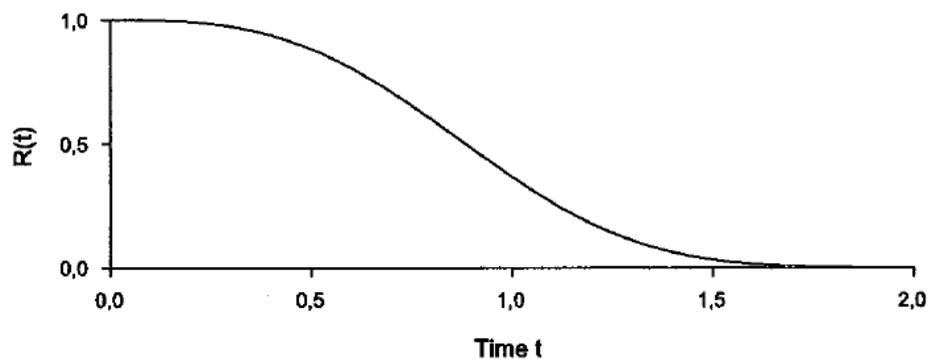
Unter Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit) versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass eine Komponente (ein System) innerhalb des Zeitintervalls  $(0, t]$  funktioniert.<sup>30</sup> Die Summe aus Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit ergeben zu jedem Zeitpunkt  $t$  100%. Dadurch gilt die Ausfallwahrscheinlichkeit als Komplement zur Überlebenswahrscheinlichkeit (Abbildung 11).<sup>31</sup>

Damit kann die Zuverlässigkeitsfunktion wie folgt beschrieben werden:

$$R(t) = 1 - F(t) = Pr(T > t)$$

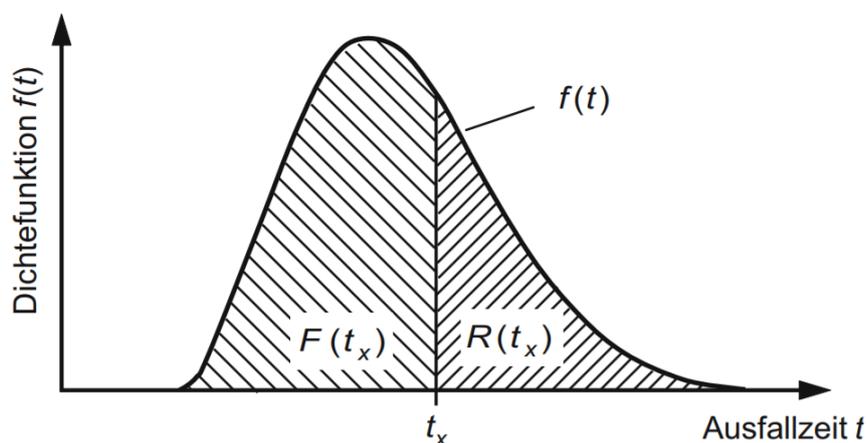
**Formel 3: Die Zuverlässigkeitsfunktion  $R(t)$** <sup>32</sup>

Die Zuverlässigkeitsfunktion weist die Eigenschaften  $R(t) \geq 0$ ,  $R(0) = 1$  und  $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$  auf.



**Abbildung 10: Die Zuverlässigkeitsfunktion  $R(t)$** <sup>33</sup>

Der Zusammenhang zwischen Dichte-, Verteilungs- und Zuverlässigkeitsfunktion wird in der folgenden Abbildung deutlich:



**Abbildung 11: Ausfallwahrscheinlichkeit / Überlebenswahrscheinlichkeit**<sup>34</sup>

<sup>30</sup> Vgl. Ebenda, S. 18.

<sup>31</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 19.

<sup>32</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 17.

<sup>33</sup> Vgl. Ebenda, S. 18.

<sup>34</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 20.

### 2.2.2.3 Ausfallrate

Die Ausfallrate  $\lambda(t)$  bezeichnet die Wahrscheinlichkeit (bezogen auf  $\Delta t$ ), im Intervall  $(t, t + \Delta t)$  auszufallen, wenn die gegebene Betrachtungseinheit bis zum Zeitpunkt  $t$  nicht ausgefallen ist.<sup>35</sup>

Die Herleitung der Ausfallrate erfolgt laut Ebeling wie folgt:<sup>36</sup>

Die Wahrscheinlichkeit im Intervall  $(t, t + \Delta t)$  auszufallen wird mit der Hilfe der Zuverlässigkeitsfunktion dargestellt.

$$\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t) = R(t) - R(t + \Delta t)$$

#### Formel 4: Die Ausfallwahrscheinlichkeit für ein Intervall

Fügt man die Bedingung einer Funktionsfähigkeit bis zum Zeitpunkt  $t$  an, verändert sich die Gleichung folgendermaßen:

$$\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

#### Formel 5: Die Ausfallwahrscheinlichkeit für ein Intervall (funktionsfähig)

Die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Fehler pro Zeiteinheit (Ausfallrate) wird durch den Ausdruck

$$\lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) * \Delta t}$$

#### Formel 6: Die Ausfallrate

beschrieben.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t} * \frac{1}{R(t)} = \frac{-dR(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

#### Formel 7: Die Ausfallrate bestehend aus Dichte- und Zuverlässigkeitsfunktion

### 2.2.2.4 Mittelwert der ausfallfreien Zeit MTTF

Der Mittelwert der ausfallfreien Zeit einer Betrachtungseinheit MTTF (Mean Time To Failure) bezeichnet die mittlere Zeit zwischen Inbetriebnahme- und dem Ausfallzeitpunkt und beschreibt somit den Erwartungswert  $E(T)$  der Lebensdauer  $T$ .<sup>37</sup>

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t * f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

#### Formel 8: Berechnung der MTTF

<sup>35</sup> Vgl. Birolini, Alessandro, 1988, S. 29.

<sup>36</sup> Vgl. Ebeling, Ch. E., 1997, S. 28f.

<sup>37</sup> Vgl. Meyna, A. und Pauli, B., 2002, S. 52.

### 2.2.2.5 Mittlere Instandsetzungsdauer MTTR, mittlere Wartungsdauer MTTPM

Die mittlere Instandsetzungsdauer MTTR (Mean Time To Repair) stellt den Mittelwert der Reparaturzeiten einer Betrachtungseinheit dar. Dabei setzen sich die Reparaturzeiten aus den Zeiten für die Ausfalllokalisierung, die Ausfallbehebung und die Funktionsprüfung zusammen. Die mittlere Wartungsdauer MTTPM (Mean Time To Preventive Maintenance) bezeichnet den Mittelwert der Zeit für eine Wartung.<sup>38</sup>

Eine Betrachtungseinheit ohne Redundanz enthält  $n$  Elemente  $E_1$  bis  $E_n$  in Serienschaltung. Um den Mittelwert der Reparaturzeit der gesamten Betrachtungseinheit ( $MTTR_S$ ) bestimmen zu können, werden die Mittelwerte der ausfallfreien Arbeitszeit ( $MTTF_i$ ) und der Mittelwert der Reparaturzeit eines Elements ( $MTTR_i$ ) benötigt:<sup>39</sup>

Für die Berechnung wird die Annahme getroffen, dass jedes Element die gleiche kumulative Betriebszeit  $T$  aufweist. Für die gesamte Betrachtungseinheit wird die Anzahl der Ausfälle durch

$$\sum_{i=1}^n \frac{T}{MTTF_i}$$

**Formel 9: Mittlere Anzahl an Ausfällen einer Betrachtungseinheit**

bestimmt. Eine mittlere totale Reparaturzeit errechnet sich aus

$$\sum_{i=1}^n MTTR_i * \frac{T}{MTTF_i}$$

**Formel 10: Mittlere totale Reparaturzeit einer Betrachtungseinheit**

Der Mittelwert der Reparaturzeit der Betrachtungseinheit kann somit berechnet werden:

$$MTTR_S = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{MTTR_i}{MTTF_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTTF_i}}$$

**Formel 11: Mittelwert der Reparaturzeit einer Betrachtungseinheit**

Weist jedes Element eine konstante Ausfallrate auf, gilt  $MTTF_i = 1/\lambda_i$ .

$$MTTR_S = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * MTTR_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_S} * MTTR_i$$

**Formel 12: Mittelwert der Reparaturzeit einer Betrachtungszeit über die Ausfallrate**

<sup>38</sup> Vgl. Birolini, Alessandro, 1988, S. 250.

<sup>39</sup> Vgl. Ebenda, S. 110f.

### 2.2.2.6 Instandhaltungswartezeit MDT und logistische Wartezeit SDT <sup>40</sup>

Die Instandhaltungswartezeit MDT (Maintenance Delay Time) beinhaltet die Wartezeit auf Instandhaltungskapazitäten oder -einrichtungen. Instandhaltungskapazitäten stellen dabei Personal, Test- oder Messgeräte, Werkzeuge, Handbücher oder andere technische Daten dar. Einrichtungen sind Reparaturwerkstätten, Prüfstände und sonstige Gebäude.

Die logistische Wartezeit SDT (Supply Delay Time) ergibt sich aus dem Warten auf die Produktion bzw. Lieferung von Ersatzteilen, administrative Durchlaufzeiten, Produktionszeiten, Beschaffungszeiten und Transportzeiten.

### 2.2.2.7 Strukturfunktion

Die Strukturfunktion  $\phi(\mathbf{X}(t))$  wird eingeführt, um ein komplexes System mit der Hilfe von Blockschaltbildern beschreiben zu können. Es stellt die logischen Verknüpfungen von Komponenten dar, die benötigt werden, um eine spezifische Systemfunktion zu gewährleisten. <sup>41</sup>

Im Fallbeispiel liegt über das ganze System betrachtet eine Serienstruktur vor. Somit wird in dieser Arbeit lediglich die Strukturfunktion der Serienstruktur angeführt. Die übrigen Strukturformen sind auf den Folgeseiten des Verweises der Serienstruktur zu finden.

Die Strukturfunktion einer Serienstruktur mit der Ordnung  $n$  beschreibt sich als: <sup>42</sup>

$$\phi(\mathbf{X}(t)) = \prod_{i=0}^n X_i(t)$$

**Formel 13: Strukturfunktion der Serienstruktur**

Im Fallbeispiel sind die Zustandsvariablen (und damit die Eigenschaften der einzelnen Komponenten) als unabhängig zu betrachten. So ergibt sich eine Vereinfachung für die Berechnung der Systemeigenschaft: <sup>43</sup>

$$E(\phi(\mathbf{X}(t))) = E\left(\prod_{i=1}^n X_i(t)\right) = \prod_{i=1}^n E(X_i(t))$$

**Formel 14: Strukturfunktion der Serienstruktur für unabhängige Zustandsvariablen**

<sup>40</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 351.

<sup>41</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 118.

<sup>42</sup> Vgl. Ebenda, S. 149.

<sup>43</sup> Vgl. Ebenda, S. 149.

### 2.2.3 Produktivität (productivity)

Als Produktivität wird die Fähigkeit einer Person oder einer Sache bezeichnet, etwas herzustellen. Auf Grund der Tatsache, dass für das Produzieren ein Mitteleinsatz benötigt wird, wird die Produktivität als ein Verhältnis von hervorgebrachten Leistungen (Output) zu verbrauchten bzw. eingesetzten Leistungen (Input) definiert. In der Betriebswirtschaftslehre wird die Produktivität durch die Gegenüberstellung des quantitativen Ergebnisses des Mitteleinsatzes (Output) zum Mitteleinsatz (Input), jeweils auf eine Periode bezogen, errechnet. Wird die ermittelte Produktivität isoliert betrachtet, beinhaltet diese keinerlei brauchbare Information. Erst durch einen Vergleich mit einer vorgegebenen Soll-Produktivität oder mit der Produktivität früherer Perioden lässt sich diese Kennzahl gewinnbringend für das Unternehmen einsetzen. <sup>44</sup>

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Mengenmäßiger Output}}{\text{Mengenmäßiger Input}}$$

**Formel 15: Definition der Produktivität** <sup>45</sup>

### 2.2.4 Zuverlässigkeit (reliability)

Die Zuverlässigkeit beschreibt die Erhaltung der Funktionstüchtigkeit einer Betrachtungseinheit. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass in der Zeitspanne T keine Betriebsunterbrechungen auftreten werden. <sup>46</sup>

Die Zuverlässigkeit wird in den VDI-Richtlinien 4001 wie folgt definiert:

*„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“* <sup>47</sup>

Die Zuverlässigkeit ist laut Rausand wie folgt gegeben: <sup>48</sup>

$$E[X_i(t)] = 0 * \Pr(X_i(t) = 0) + 1 * \Pr(X_i(t) = 1) = p_i(t)$$

**Formel 16: Zuverlässigkeit einer Komponente**

#### 2.2.4.1 Systemzuverlässigkeit

Kann lediglich die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten ermittelt werden, so ist es sinnvoll, eine Systemzuverlässigkeit daraus zu bilden. Soll die Zuverlässigkeit eines gesamten Systems mit n Komponenten berechnet werden, so erfolgt dies über die

<sup>44</sup> Vgl. Diederich, H., 1993, S. 70.

<sup>45</sup> Vgl. Preißler, P. R., 2008, S. 150.

<sup>46</sup> Vgl. Birolini, Alessandro, 1988, S. 2.

<sup>47</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure, 1986.

<sup>48</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 148.

Strukturfunktion  $\phi(\mathbf{X}(t))$ . Die Systemzuverlässigkeit  $p_S(t)$  ist daher abhängig von der Struktur der Systems und kann wie folgt beschrieben werden: <sup>49</sup>

$$p_S(t) = E(\phi(\mathbf{X}(t)))$$

**Formel 17: Zuverlässigkeit eines Systems**

### 2.2.5 Instandhaltbarkeit (maintainability)

Die Instandhaltbarkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass der bestimmte Betriebszustand eines instandhaltungsbedürftigen Systems innerhalb eines bestimmten Zeitraums beibehalten wird (Wartung), oder dieser Zustand wiederhergestellt wird (Instandsetzung). Um eine allgemeine Definition der Instandhaltbarkeit zu erhalten, wird die Zufallsvariable der benötigten Instandhaltungszeit  $T_I$  eingeführt. Sie soll kleiner als eine vorgegebene Instandhaltungsgrenzzeit  $t$  sein. Die Instandhaltbarkeitsfunktion  $M(t)$  ist somit gegeben als: <sup>50</sup>

$$M(t) = P(T_I \leq t)$$

**Formel 18: Definition der Instandhaltbarkeit**

Wenn die Reparaturzeit der Exponentialfunktion folgt, dann gilt für die Instandhaltbarkeit folgender Zusammenhang:

$$M(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{MTTR}\right)$$

**Formel 19: Instandhaltbarkeit für eine Exponentialverteilung der Reparaturzeit** <sup>51</sup>

Bei der zugrundeliegenden Exponentialverteilung kann die Reparaturrate  $\mu = 1/MTTR$  als konstant betrachtet werden. Den Parameter der Funktion stellt MTTR dar.

Folgt die Reparaturzeit einer logarithmischen Normalverteilung, so wird der Berechnungsaufwand durch die zwei vorliegenden Parameter mittlere Zeit zur Reparatur  $t_{med}$  und Standardabweichung  $s$  höher. Die genaue Vorgehensweise wird im Buch von Ebeling geschildert. <sup>52</sup>

---

<sup>49</sup> Vgl. Ebenda, S. 148.

<sup>50</sup> Vgl. Salvendy, G., 2001, S. 1946.

<sup>51</sup> Vgl. Ebenda, S. 1946.

<sup>52</sup> Vgl. Ebeling, Ch. E., 1997, S. 192ff.

## 2.2.6 Verfügbarkeit (availability)

Nach dem ersten Ausfall eines technischen Systems ist sein Einsatz in den meisten Fällen noch nicht beendet. Mit der Hilfe von Instandhaltungsmaßnahmen wird das System wieder betriebsfähig gemacht. Die Verfügbarkeit eines Systems wird durch die Zuverlässigkeit und die Qualität der Instandhaltung maßgeblich beeinflusst.<sup>53</sup>

Birolini definiert die Verfügbarkeit wie folgt:

*„Die Verfügbarkeit (Punkt-Verfügbarkeit) wird als Wahrscheinlichkeit definiert, dass die Betrachtungseinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen ausführt.“<sup>54</sup>*

Allgemein wird bei der Verfügbarkeit zwischen Punktverfügbarkeit und Dauerverfügbarkeit unterschieden. Der Zusammenhang wird mit der folgenden Abbildung verdeutlicht:

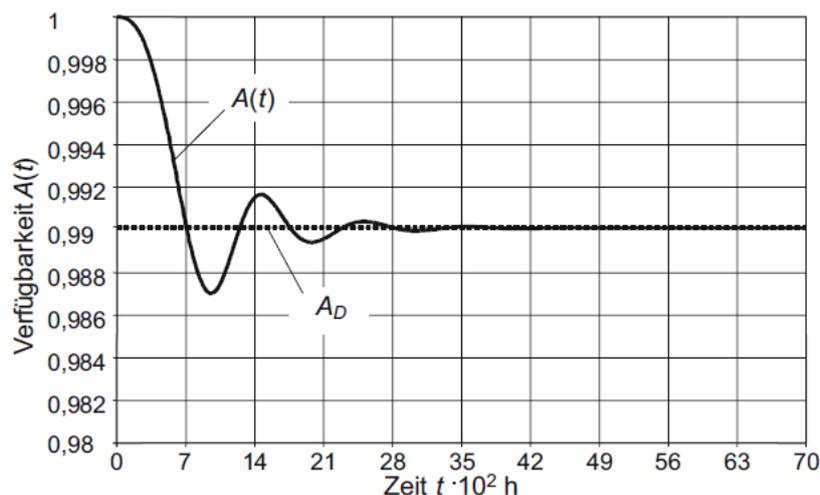


Abbildung 12: Punktverfügbarkeit  $A(t)$  und Dauerverfügbarkeit  $A_D$

### 2.2.6.1 Punktverfügbarkeit<sup>55</sup>

Die Verfügbarkeit  $A(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  (oftmals auch Punktverfügbarkeit genannt) eines reparierbaren Systems ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System zum Zeitpunkt  $t$  funktionsfähig ist:

$$A(t) = \Pr(X(t) = 1)$$

#### Formel 20: Definition der Punktverfügbarkeit

Wenn die Einheit nicht repariert ist, ergibt sich die Punktverfügbarkeit aus  $A(t) = R(t)$ .

<sup>53</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 355.

<sup>54</sup> Vgl. Birolini, Alessandro, 1988, S. 7.

<sup>55</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 367f.

### 2.2.6.2 Allgemeine Definition der Dauerverfügbarkeit <sup>56</sup>

Die Dauerverfügbarkeit  $A_D$  lässt sich laut Bertsche allgemein definieren als

$$A_D = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + \bar{M}} = \frac{1}{1 + \frac{\bar{M}}{MTTF}}$$

#### Formel 21: Allgemeine Definition der Dauerverfügbarkeit

mit der mittleren Stillstandzeit  $\bar{M}$ .

### 2.2.6.3 Innere (inhärente) Dauerverfügbarkeit

Die innere Dauerverfügbarkeit berücksichtigt nur die Zeit, die für korrektive Maßnahmen auf Grund eines ungeplanten Stillstandes benötigt wird. Sie wird als Verfügbarkeit beschrieben, die lediglich die korrektive Instandhaltung (Instandsetzung) beinhaltet. <sup>57</sup>

Die innere Dauerverfügbarkeit errechnet sich wie folgt:

$$A_D^{(i)} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \text{ mit } \bar{M} = MTTR$$

#### Formel 22: Innere Dauerverfügbarkeit <sup>58</sup>

### 2.2.6.4 Operative Dauerverfügbarkeit

Die operative Dauerverfügbarkeit lässt sich durch die folgende Formel bestimmen:

$$A_D^{(o)} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR + MTTPM + SDT + MDT} \text{ mit } \bar{M} = MTTR + MTTPM + SDT + MDT$$

#### Formel 23: Operative Dauerverfügbarkeit <sup>59</sup>

Die operative Dauerverfügbarkeit beinhaltet somit die mittleren geplanten Stillstände (auf Grund der MTTPM) und die mittleren ungeplanten Stillstände (über die MTTR, SDT und MDT).

Rausand sieht für die Berechnung der operativen Dauerverfügbarkeit einen alternativen Zugang. Demnach errechnet sich das Komplement der operativen Dauerverfügbarkeit (benannt als operative Nichtverfügbarkeit) wie folgt: <sup>60</sup>

$$\bar{A}_D^{(o)} = \frac{\text{Mean total planned downtime} + \text{Mean total unplanned downtime}}{\text{Mission period}}$$

#### Formel 24: Operative Nichtverfügbarkeit laut Rausand

<sup>56</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 356.

<sup>57</sup> Vgl. Duta, L., 2012, S. 388.

<sup>58</sup> Vgl. Bertsche, B., 2004, S. 358.

<sup>59</sup> Vgl. Ebenda, S. 358.

<sup>60</sup> Vgl. Rausand, M., 2004, S. 372.

Die operative Dauerverfügbarkeit ergibt sich damit aus:

$$A_D^{(o)} = 1 - \bar{A}_D^{(o)}$$

**Formel 25: Operative Dauerverfügbarkeit laut Rausand**

### 2.2.6.5 Systemverfügbarkeit

Können lediglich die Verfügbarkeiten der einzelnen Komponenten ermittelt werden, so ist es sinnvoll, eine Systemverfügbarkeit daraus zu bilden. Soll die Verfügbarkeit eines gesamten Systems mit  $n$  Komponenten berechnet werden, so erfolgt dies über die Strukturfunktion  $\phi(X(t))$ . Die Systemverfügbarkeit  $A_S(t)$  ist daher abhängig von der Struktur der Systems und kann wie folgt beschrieben werden: <sup>61</sup>

$$A_S(t) = E(\phi(X(t)))$$

**Formel 26: Systemverfügbarkeit**

Die Formel der Systemverfügbarkeit wird für die Berechnung der Punktverfügbarkeit und der Dauerverfügbarkeit eines Systems verwendet.

### 2.2.7 Gesamtanlageneffizienz OEE (Overall Equipment Efficiency)

Für die Ermittlung der OEE wird diese in drei separate Komponenten unterteilt, die jeweils einen anderen Aspekt des betrachteten Produktionsprozesses darstellen: <sup>62</sup>

- Verfügbarkeit (Nutzung)
- Leistung
- Qualität

Die Verbesserung einer Komponente führt zur Verbesserung des Prozesses. Dies verdeutlicht auch die Berechnungsformel der OEE:

$$OEE = \text{Nutzungsgrad} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsgrad}$$

**Formel 27: Gesamtanlageneffizienz OEE <sup>63</sup>**

Für die Berechnung des Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrades werden bestimmte Betriebszeiten benötigt. Ausgangspunkt ist dabei die gesamte Zeit des Betrachtungszeitraumes ( $A$ ). Durch Verluste verringert sich diese Zeit bis zur wertschöpfenden Betriebsmittelzeit:

---

<sup>61</sup> Vgl. Ebenda, S. 374.

<sup>62</sup> Vgl. Stamatidis, D. H., 2010, S. 24.

<sup>63</sup> Vgl. Matyas, K., 2010, S. 225.

Benennung	Benennung von Matyas	Abk.	Verluste	Berechnungsformel
Gesamte Zeit	Gesamte Zeit	A	-	
Arbeitszeit	Arbeitszeit	B	<u>Produktionsfreie Zeit:</u> z.B. Wochenende, Feiertage, ...	$B = A - \text{produktionsfreie Zeit}$
Verfügbare Betriebsmittelzeit	Soll Anlagenverfügbarkeit	C	<u>Geplante Stillstände:</u> z.B. Rüstvorgänge, Pausen, geplante Wartungen, Umbauten, ...	$C = B - \text{geplante Stillstände}$
Netto Betriebsmittelzeit	Ist Anlagenverfügbarkeit	D	<u>Ungeplante Stillstände:</u> z.B. Betriebsmittelausfälle auf Grund von technischen Störungen, betriebsmittelunabhängige Stillstände, ...	$D = C - \text{ungeplante Stillstände}$
Nutzbare Betriebsmittelzeit	Bandbelegungszeit	E	<u>Geschwindigkeitsverluste:</u> z.B. Leerlauf, Kurzstillstände (Probleme in der Materialzuführung, Blockierung von Werkstücken, . . .), verringerte Taktgeschwindigkeit, ...	$E = D - \text{Geschwindigkeitsverl.}$
Wertschöpfende Betriebsmittelzeit	Produktionszeit Teile i.O.	F	<u>Qualitätsverluste:</u> z.B. Ausschuss, Nacharbeit, ...	$F = E - \text{Qualitätsverluste}$

Tabelle 3: Betriebszeiten zur Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgradberechnung

Zur Veranschaulichung wird das Balkenmodell von Matyas herangezogen, welches den Zusammenhang der Kennzahlen mit den Betriebszeiten abbildet:

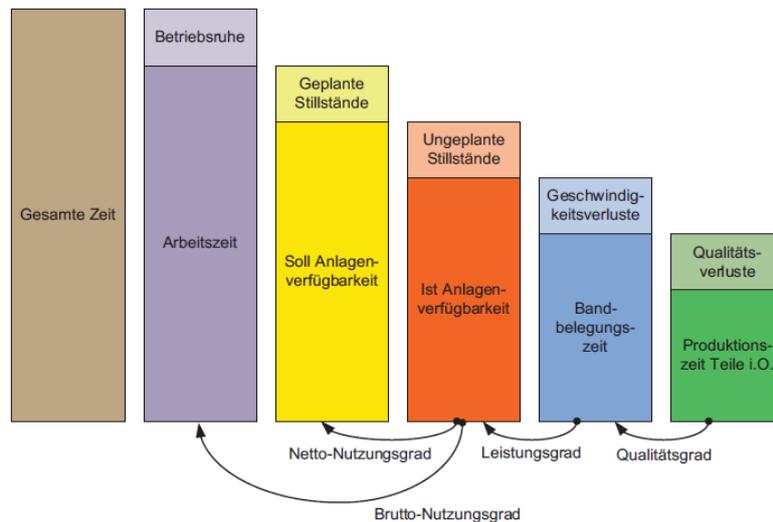


Abbildung 13: Brutto- bzw. Netto-Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad <sup>64</sup>

Zur Berechnung des Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrades werden die zuvor ermittelten Betriebszeiten wie folgt verwendet:

Kennzahl	Berechnungsformel
Brutto-Nutzungsgrad	$= \frac{\text{Netto Betriebsmittelzeit } D}{\text{Arbeitszeit}} = \frac{D}{B}$
Netto-Nutzungsgrad	$= \frac{\text{Netto Betriebsmittelzeit}}{\text{Verfügbare Betriebsmittelzeit}} = \frac{D}{C}$
Leistungsgrad	$= \frac{\text{Nutzbare Betriebsmittelzeit } E}{\text{Netto Betriebsmittelzeit}} = \frac{E}{D}$
Qualitätsgrad	$= \frac{\text{Wertschöpfende Betriebsmittelzeit } F}{\text{Nutzbare Betriebsmittelzeit}} = \frac{F}{E}$

Tabelle 4: Berechnung von Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad

<sup>64</sup> Vgl. Ebenda, S. 229.

Im Modell von Hansen findet keine Unterteilung der OEE in die Komponenten statt. Es soll in dieser Arbeit lediglich als Alternative aufgezeigt werden:

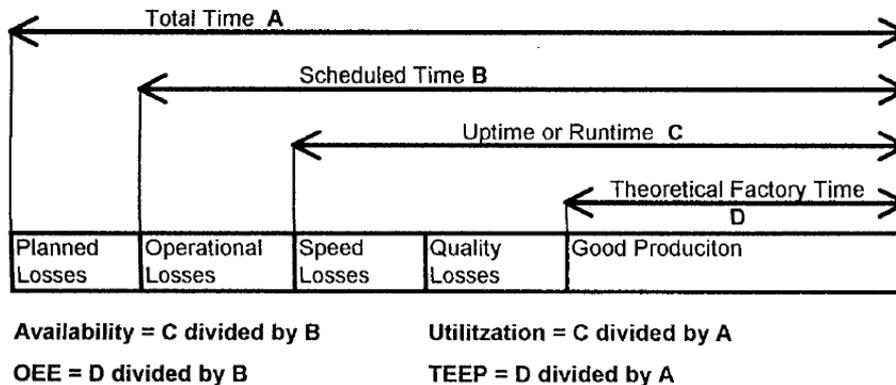


Abbildung 14: Berechnung der OEE laut Hansen <sup>65</sup>

## 2.3 Bayessches Netzwerk

Ein BN ist ein grafisches Modell, das probabilistische Beziehungen zwischen Variablen abbildet. <sup>66</sup>

### 2.3.1 Allgemeines

Das BN setzt sich aus einem qualitativen und einem quantitativen Teil zusammen. <sup>67</sup>

Der qualitative Teil besteht aus gerichteten azyklischen Graphen (DAG), in denen eine Variable von einem Knoten repräsentiert wird und eine kausale Beziehung zwischen den Variablen von einem Pfeil dargestellt wird. <sup>68</sup>

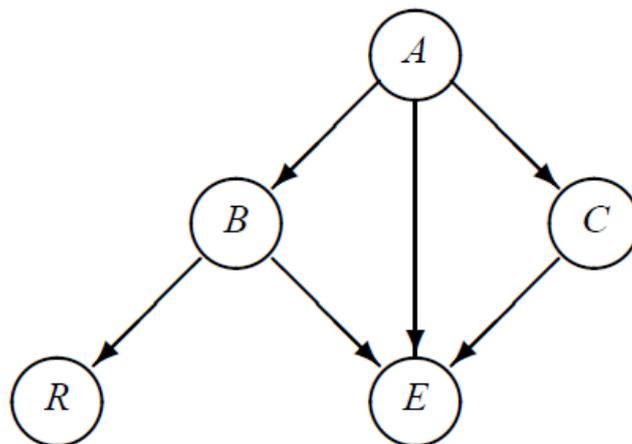


Abbildung 15: Beispiel für ein BN <sup>69</sup>

<sup>65</sup> Vgl. Hansen, R. C., 2002, S. 46.

<sup>66</sup> Vgl. Heckerman, David, 1997, S. 79.

<sup>67</sup> Vgl. Kraaijeveld, P. und Druzdzel, M., 2005, S. 175.

<sup>68</sup> Vgl. Pearl, Judea, 1988, S. 50.

<sup>69</sup> Vgl. Kraaijeveld, P., 2005, S. 176.

Der DAG wird laut Beierle wie folgt definiert:

**„Definition B.1 (gerichteter Graph)** Ein gerichteter Graph ist ein Paar  $G = \langle V, \varepsilon \rangle$ , wobei  $V$  eine Menge von Ecken (vertices) oder Knoten (nodes) ist und  $\varepsilon \subseteq V \times V$  eine Menge von Knotenpaaren  $(v, w)$  ist, den Kanten (edges) von  $G$ .“<sup>70</sup>

**„Definition B.5 (azyklisch, DAG)** Ein Graph heißt azyklisch, wenn er keinen Zyklus enthält. Ein gerichteter, azyklischer Graph wird mit dem Kürzel DAG (directed acyclic graph) bezeichnet.“<sup>71</sup>

Im BN wird den einzelnen Variablen jeweils ein Knoten  $A_i$  zugewiesen. Die Knoten  $A_i$  werden durch Pfeile mit jenen Knoten  $pa(A_i)$  (Elternknoten) verbunden, die als direkte Ursachen von  $A_i$  (Kindknoten) gelten, wobei die Pfeilspitze auf den Knoten  $A_i$  zeigt.<sup>72</sup>

Jeder Knoten (bzw. jede Variable) besitzt eine bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle (CPT, conditional probability table), die den quantitativen Teil des BN bildet. In der CPT eines betrachteten Knotens (bzw. Variable) wird den definierten Zuständen des betrachteten Knotens für jede mögliche Zustandskombination der Elternknoten ein bedingter Wahrscheinlichkeitswert  $P(a_i | pa(A_i))$  zugewiesen. Hat eine Variable keine Elternknoten, so scheinen in der CPT die einzelnen Zustände mit ihren zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitswerten auf. Die gesamte gemeinsame Verteilungsfunktion ist durch folgendes Produkt gegeben:<sup>73</sup>

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i | pa(A_i))$$

#### Formel 28: Gesamte gemeinsame Verteilungsfunktion

**Beispiel:** Für ein besseres Verständnis wird die Verteilungsfunktion an Abbildung 15 angewandt. Daraus resultiert folgende Formel:

$$P(A, B, C, E, R) = P(A) P(B|A) P(C|A) P(E|A, B, C) P(R|B)$$

#### Formel 29: Anwendung der Verteilungsfunktion

Die Definition eines BN lautet nach Beierle wie folgt:

**„Definition 13.25 (Bayessches Netzwerk)** Sei  $V = \{A_1, \dots, A_n\}$  eine Menge von Aussagenvariablen, sei  $P$  eine gemeinsame Verteilung über  $V$ , und sei  $G = \langle V, \varepsilon \rangle$  ein DAG. Für jedes  $A_i \in V$  bezeichne  $pa(A_i) \subseteq V$  die Menge aller Eltern(knoten),  $de(A_i) \subseteq V$  die

<sup>70</sup> Vgl. Beierle, C. und Kern-Isberner, G., 2014, S. 506.

<sup>71</sup> Vgl. Ebenda, S. 507.

<sup>72</sup> Vgl. Pearl, Judea, 1988, S. 51.

<sup>73</sup> Vgl. Ebenda, S. 51.

Menge aller Nachkommen und  $nd(A_i) \subseteq V$  die Menge aller Nicht-Nachkommen von  $A_i$  (siehe Definitionen B.6 und B.7 in Anhang B.1).

$\beta = \langle V, \varepsilon, P \rangle$  wird Bayessches Netzwerk (Bayesian network) genannt, wenn für jede Variable  $A_i$  gilt

$$A_i \perp\!\!\!\perp_P nd(A_i) | pa(A_i)$$

Wenn also jede Variable  $A_i$  bedingt unabhängig ist von ihren Nicht-Nachkommen  $nd(A_i)$  bei gegebenen Werten ihrer Elternknoten  $pa(A_i)$ .“<sup>74</sup>

### 2.3.2 Vorgehensweise<sup>75</sup>

Die Bildung des Netzwerkes erfolgt in drei nachfolgenden Schritten, wobei im ersten Schritt ein objektorientiertes Bayessches Netzwerk (OOBN, object-oriented Bayesian Network) gebildet wird. Dafür ist es notwendig, das betrachtete System und dessen Informationen zu studieren, um im Anschluss das Modell zu bilden.

Aus dem OOBN wird im folgenden Schritt ein Bayessches Netzwerk (BN) geformt, indem die Struktur des OOBN analysiert wird und relevante Daten zum Erzeugen des BN verwendet werden.

Im letzten Schritt wird ein DBN aus dem BN abgeleitet. Dafür wird eine zeitliche Komponente für jene Knoten eingeführt, deren Eigenschaften sich mit dem betrachteten Zeitpunkt ändern.

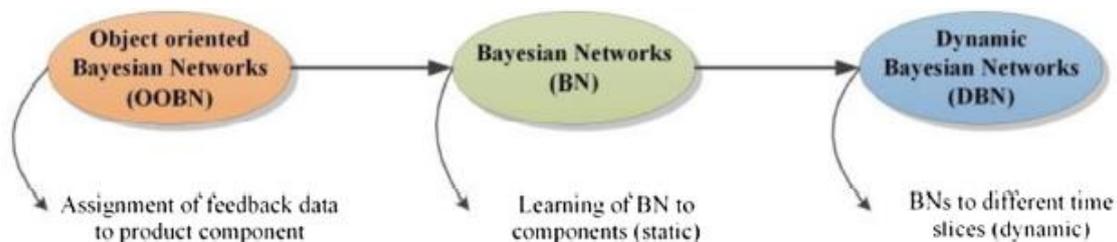


Abbildung 16: Die drei Schritte zur Erstellung eines BN

Wie ein Arbeitsablauf zur Erstellung eines BN aussehen kann, zeigt Abbildung 17. Die Erstellung eines BN kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. In diesem Fall wird das BN automatisch durch einen Lernalgorithmus erstellt. Die weiteren Ausführungen zu OOBN, BN und DBN finden in den folgenden Kapiteln statt.

<sup>74</sup> Vgl. Beierle, C., 2014, S. 428f.

<sup>75</sup> Vgl. Dienst, S. u.a., 2015, S. 11 ff.

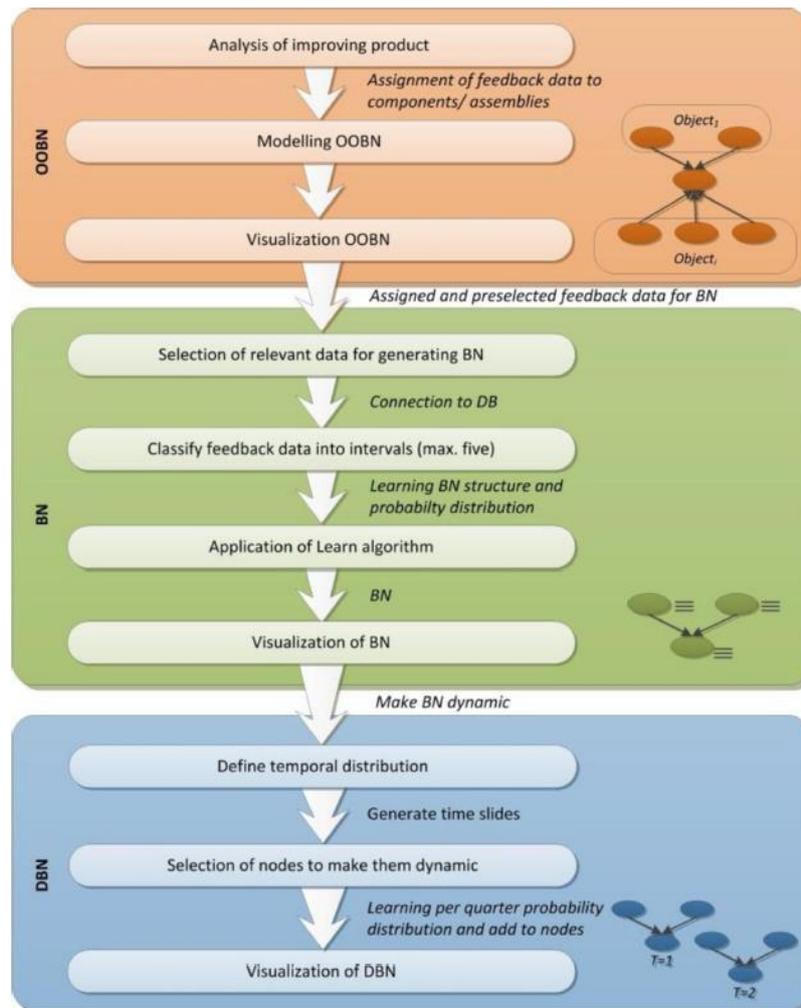


Abbildung 17: Arbeitsablauf zur Erstellung eines BN

### 2.3.2.1 Objektorientiertes Bayessches Netzwerk (OOBN) <sup>76</sup>

Die Bildung eines OOBN wird der Bildung eines BN vorgelagert, da die Komplexität bei der Bildung eines BN dadurch erheblich reduziert wird. In einem OOBN (siehe Abbildung 18) werden verschiedene Ebenen (operating data, maintenance data, . . .) betrachtet, die wiederum Subebenen (heat meter, operating hours, . . .) in sich enthalten. Die Subebenen sind im Falle der Abbildung Objekte, die über Knoten dargestellt werden. Diese Objekte beinhalten Variablen bzw. Attribute, die das Objekt näher beschreiben.

Mit dieser Methode wird sichergestellt, dass bei ähnlichen Objekten, welche ähnliche Eigenschaften besitzen, dieselben Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften genutzt werden und so Objekte in einem Knoten zusammengeschlossen werden. Dies führt zu einer geringeren Anzahl an Parameter im gesamten Modell und somit zu einer Reduzierung der Komplexität.

<sup>76</sup> Vgl. Koski, T. und Noble, J., 2009, S. 63 ff.

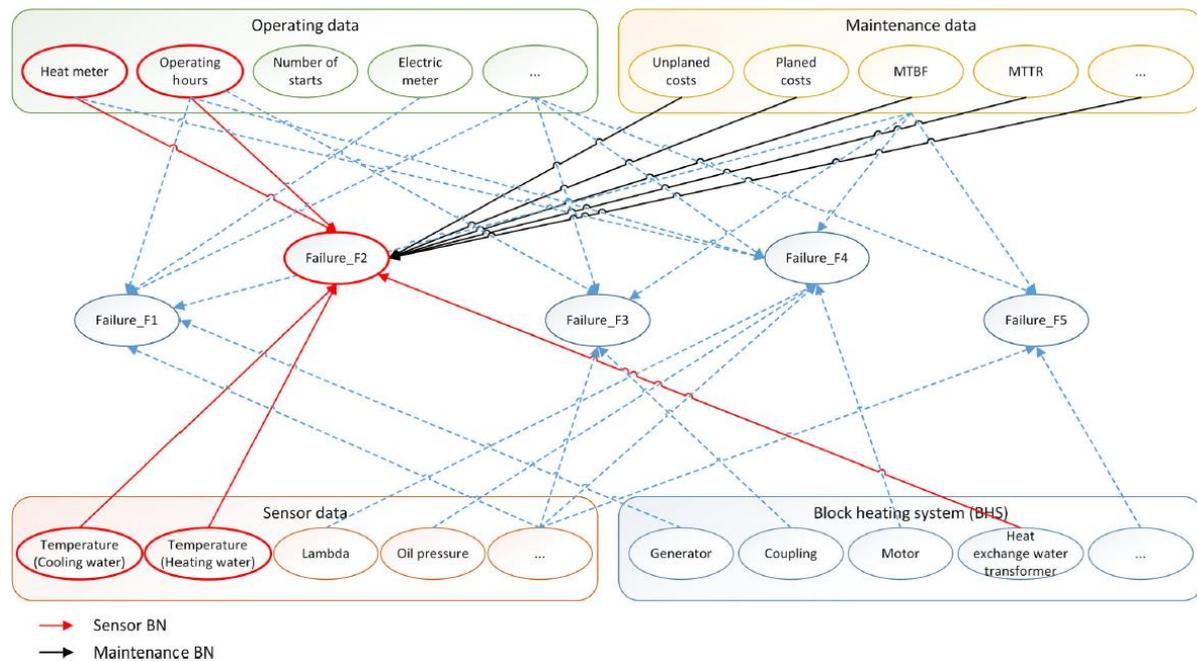


Abbildung 18: Anwendungsbeispiel eines OOBN (Blockheizungssystem) <sup>77</sup>

### 2.3.2.2 Bayessches Netzwerk (BN) <sup>78</sup>

Ein BN ist in der Lage, die relevante Wahrscheinlichkeit einer unsicheren Variable zu berechnen, indem Informationen durch zugrundeliegende Variablen gegeben sind. Diese Eigenschaft und die Möglichkeit der Modellierung von komplexen Beziehungen zwischen unsicheren Variablen machen das BN zu einer passenden Methode für die Bildung diagnostischer Modelle.

Obwohl die Eignung des BN für eine Diagnose bereits mehrfach bewiesen wurde, ist die Methode zum jetzigen Zeitpunkt auf Grund des zeitlichen Aufwandes nicht weit verbreitet und akzeptiert.

Bei der Modellbildung wird sowohl der qualitative als auch der quantitative Teil des BN gestaltet. Dies wird durch drei verschiedene Varianten ermöglicht:

- Die Struktur und die Parameter werden automatisch aus den Daten gebildet.
- Die Struktur und die Parameter werden durch einen Experten manuell gebildet.
- Die Struktur und die Parameter werden durch eine Kombination aus der automatischen und der manuellen Variante gebildet.

### 2.3.2.3 Dynamisches Bayessches Netzwerk (DBN) <sup>79</sup>

Ein BN stellt die probabilistischen Beziehungen zwischen Variablen zu einem gewissen Zeitpunkt dar. Es enthält allerdings keinerlei Informationen, wie ein Variablenwert zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem Variablenwert zu einem früheren Zeitpunkt

<sup>77</sup> Vgl. Dienst, S., 2015, S. S. 14.

<sup>78</sup> Vgl. Kraaijeveld, P., 2005, S. 175.

<sup>79</sup> Vgl. Dienst, S. u.a., 2010, S. 942.

verknüpft ist. In realen Situationen (z.B. Diagnose der Instandhaltung) ist es jedoch wichtig, zeitliche Beziehungen zu modellieren.

Während ein BN statisch ist und einen konkreten Zeitpunkt (bzw. eine konkrete Zeitspanne) repräsentiert, wird bei einem DBN das BN dynamisch erweitert, um Prozessvariablen unterschiedlicher Zeitpunkte miteinander zu verknüpfen. Das Modell wird dabei um eine zeitliche Komponente erweitert. Dadurch können sowohl Beziehungen zwischen der gleichen Variable über die Zeit als auch Beziehungen von unterschiedlichen Variablen über die Zeit berücksichtigt werden.

## 2.4 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik von BN im Kontext der Instandhaltung mit der Hilfe von Forschungsarbeiten dargelegt.

### 2.4.1 Beginn der Anwendung von BN in Bezug auf Instandhaltung <sup>80</sup>

Die ersten Forschungsarbeiten, die eine Anwendung von BN zur Behandlung von Instandhaltungsthemen beschreiben, wurden um die Jahrtausendwende veröffentlicht. Die Anzahl dieser Arbeiten steigt in weiterer Folge rapide an und das Thema stößt in der Forschung auf breite Anerkennung.

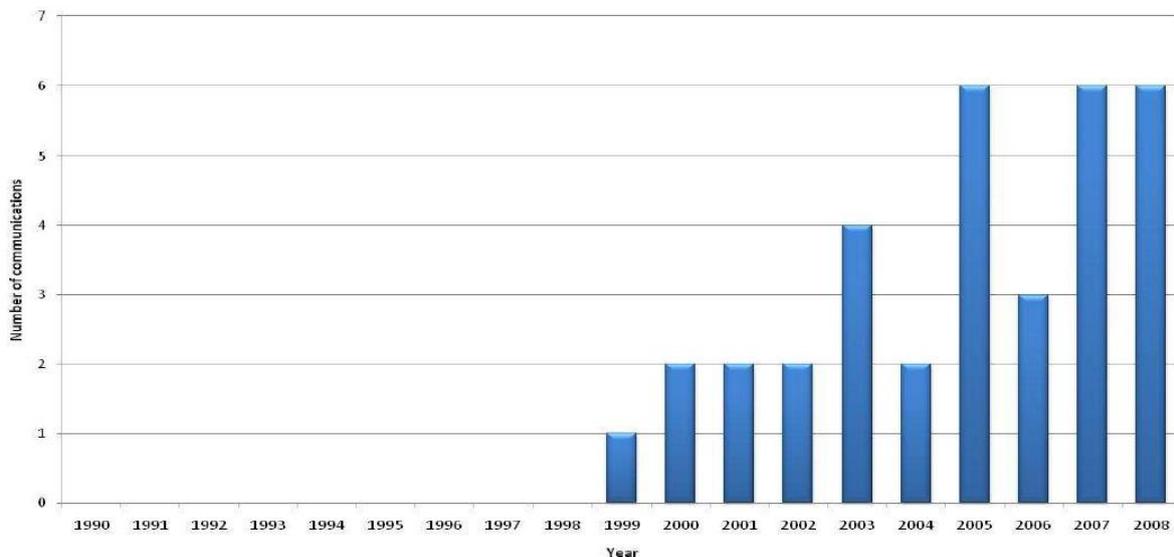


Abbildung 19: Forschungsarbeiten zum Thema instandhaltungsrelevanter BN <sup>81</sup>

Als erste Veröffentlichung zu diesem Thema wird die Forschungsarbeit von Kang C. W. und Golay M. W. gesehen, die in ihrer Arbeit ein Beratungssystem auf der Basis

<sup>80</sup> Vgl. Weber, P. u.a., 2012, S. 679 ff.

<sup>81</sup> Vgl. Ebenda, S. 679.

eines Wahrscheinlichkeitsnetzwerkes für die Diagnose der betrieblichen Verfügbarkeit eines komplexen Kernkraftwerks entwickelten.<sup>82</sup>

## 2.4.2 Vorschreibende Instandhaltung (prescriptive maintenance)<sup>83</sup>

In dieser Forschungsarbeit wird eine Weiterentwicklung der vorausschauenden Instandhaltung durch die vorschreibende Instandhaltung (prescriptive maintenance) vorgestellt. Während die vorausschauende Instandhaltung angibt, was in der Zukunft passieren wird, beantwortet die vorschreibende Instandhaltung die Frage, wie der Instandhaltungsprozess zukünftig verbessert bzw. optimiert werden kann.

Die vorschreibende Instandhaltung beinhaltet maschinelles Lernen, Modellierung von Expertenwissen, vorausschauende Datenanalyse und semantisches Denken, um Entscheidungsprozesse im gesamten Instandhaltungsmanagement durch optimale Auswahl und Vorschlag der richtigen Strategien, Taktiken und Aktionspläne zu optimieren.

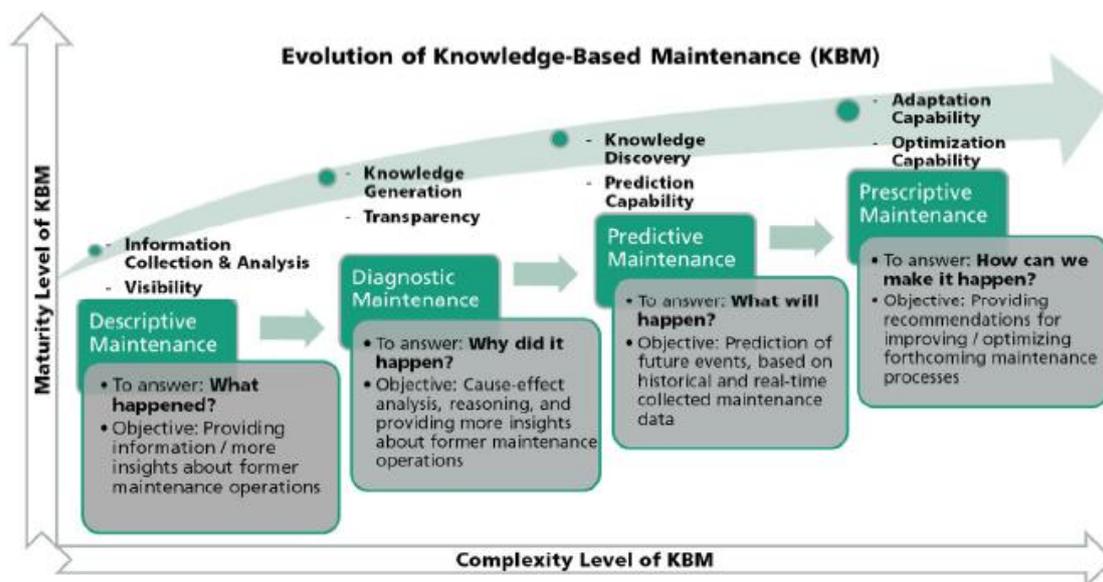


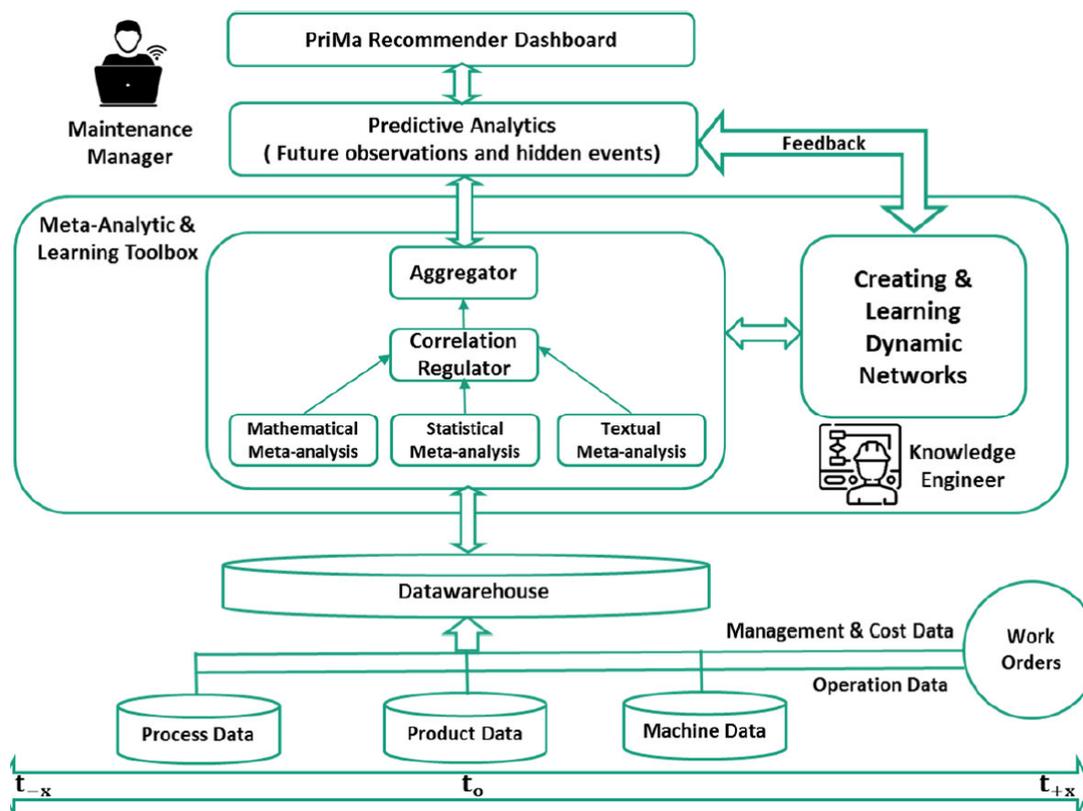
Abbildung 20: Die vier Reifegrade der wissensbasierten Instandhaltung<sup>84</sup>

In Abbildung 21 wird das Konzept des Prescriptive Maintenance Modells (PriMa, Modell für eine vorschreibende Instandhaltung) dargestellt. Das Datenlager (data warehouse) sammelt kontinuierlich Daten aus drei Dimensionen (Prozessdaten, Produktdaten, Maschinendaten) auf Basis der operativen Ebene und Managementebene. Diese drei Dimensionen sind horizontal und vertikal verbunden, wobei bei der horizontalen Verbindung die Daten entweder aus der operativen Ebene oder aus der Managementebene gewonnen werden und die vertikale Verbindung die Datengewinnung aus beiden Ebenen ermöglicht.

<sup>82</sup> Vgl. Kang, C. W. und Golay, M. W., 1999.

<sup>83</sup> Vgl. Ansari, F. u.a., 2017, S. 1 ff.

<sup>84</sup> Vgl. Ebenda, S. 2.

Abbildung 21: Das Modell PriMa <sup>85</sup>

Die Meta-Analyse-Algorithmen bestehen aus mathematischen, statistischen und textuellen meta-analytischen Algorithmen. Aus dem Ergebnis der einzelnen Algorithmen werden die Zusammenhänge bzw. Wechselbeziehungen identifiziert und diese wiederum als Ergebnisse gesammelt, um Ausfälle und Fehler zu vermeiden. Damit aus den Meta-Analysen gelernt wird und die zukünftigen Ereignisse vorhergesagt werden, wird ein DBN verwendet.

### 2.4.3 Werkzeug für eine zustandsorientierte Instandhaltung <sup>86</sup>

In dieser Studie wird eine Methode entwickelt, die mit Hilfe der Monte Carlo Simulation und einem BN-basierten Entscheidungswerkzeug eine Optimierung der Verfügbarkeit, der Zuverlässigkeit und der Instandhaltbarkeit (RAM-Optimierung, reliability – availability - maintainability optimization) ermöglicht.

Die Methodik besteht aus vier Hauptmodulen (siehe Abbildung 22), die entweder an einem bekannten System oder einem neu eingeführten System in der Entwurfsphase angewendet werden.

<sup>85</sup> Vgl. Ebenda, S. 4.

<sup>86</sup> Vgl. Gruber, A. u.a., 2013, S. 376.

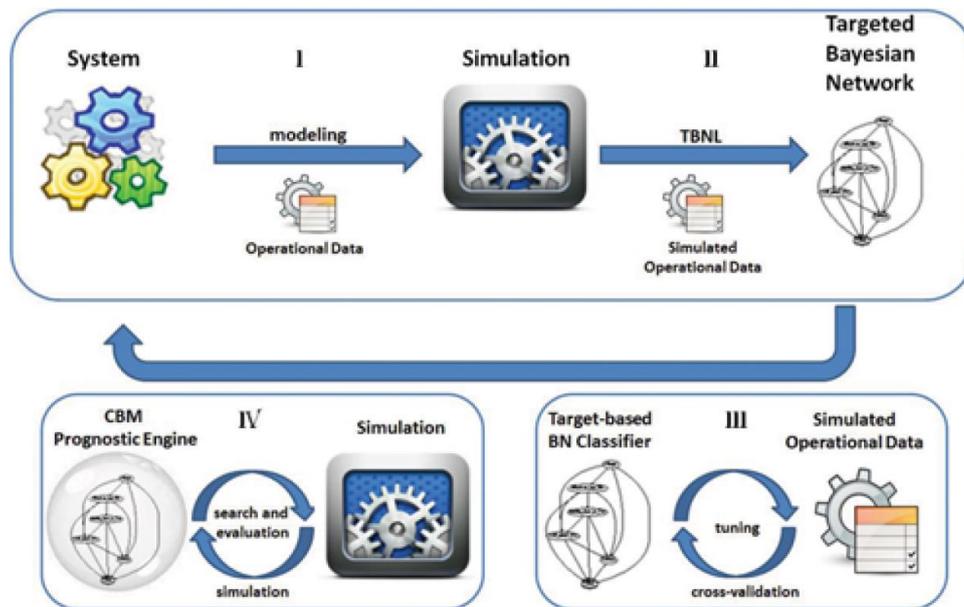


Abbildung 22: Methode zur RAM-Optimierung <sup>87</sup>

Die einzelnen Module werden in weiterer Folge erklärt:

#### I. Systemmodellierung und Simulation:

Der Systembetriebslebenszyklus wird durch Verwendung eines Simulators, der auf datenunterstütztem Expertenwissen basiert, modelliert. Anschließend wird ein Validierungstest durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Simulation das System in seinen vielzähligen Szenarios zuverlässig abbildet.

#### II. Lernen des BN-Modells aus den simulierten Daten:

Der TBNL-Algorithmus (targeted BN learning algorithm) wird an den simulierten Daten angewendet, um ein gezieltes BN zu erzeugen. Das BN wird als kompaktes Prognosemodell für zustandsorientierte Instandhaltung durch Fehlervorhersage verwendet.

#### III. Verfeinern des zustandsorientierten Instandhaltungsmodells über ein Abstimmen des BN-Modells durch Kreuzvalidierung:

Um eine zufriedenstellende Ausfallvorhersageleistung zu erreichen, wird eine iterative Verfeinerung des gezielten BN-Modells durch Abstimmen der Parameter des TBNL-Algorithmus ausgeführt.

#### IV. Suche nach einer effektiven Instandhaltungspolitik basierend auf dem entwickelten zustandsorientierten Instandhaltungsmodell:

Das BN-Modell wird zum Generieren einer Klasse von Instandhaltungsrichtlinien, die durch unterschiedliche Schwellenwerte für die vorhergesagten Ausfallwahrscheinlich-

<sup>87</sup> Vgl. Ebenda, S. 376.

keiten des Systems ausgelöst werden, verwendet. Im Anschluss wird jede Instandhaltungsrichtlinie durch den Simulator bewertet und in Bezug auf das gewünschte Ergebnis (z.B. minimale Lebenszykluskosten, maximaler Gewinn, . . .) ausgewählt.

#### 2.4.4 BN für die Messung der Lean Management-Leistung <sup>88</sup>

In der Forschungsarbeit von Büyüközkan wird ein BN für die Messung der Leistung von Lean Management implementiert. Die vorausschauende Instandhaltung stellt dabei ein Lean-Kriterium dar. Die Methode besteht aus fünf Schritten:

##### I. Finden der Lean Management- und Geschäftsleistungskriterien

Nach einer umfassenden Literaturrecherche wurden 15 Lean-Kriterien (z.B. Lean 8: vorausschauende Instandhaltung) ausgewählt und in das Modell integriert. Außerdem wurden vier Erfolgsvariablen (Flexibilität, Zuverlässigkeit, Qualität und Zeit) und drei Entscheidungsvariablen (finanzielle Leistung, finanzielle Nichtleistung und Nachhaltigkeit) definiert.

##### II. Konstruieren des kausalen Plans

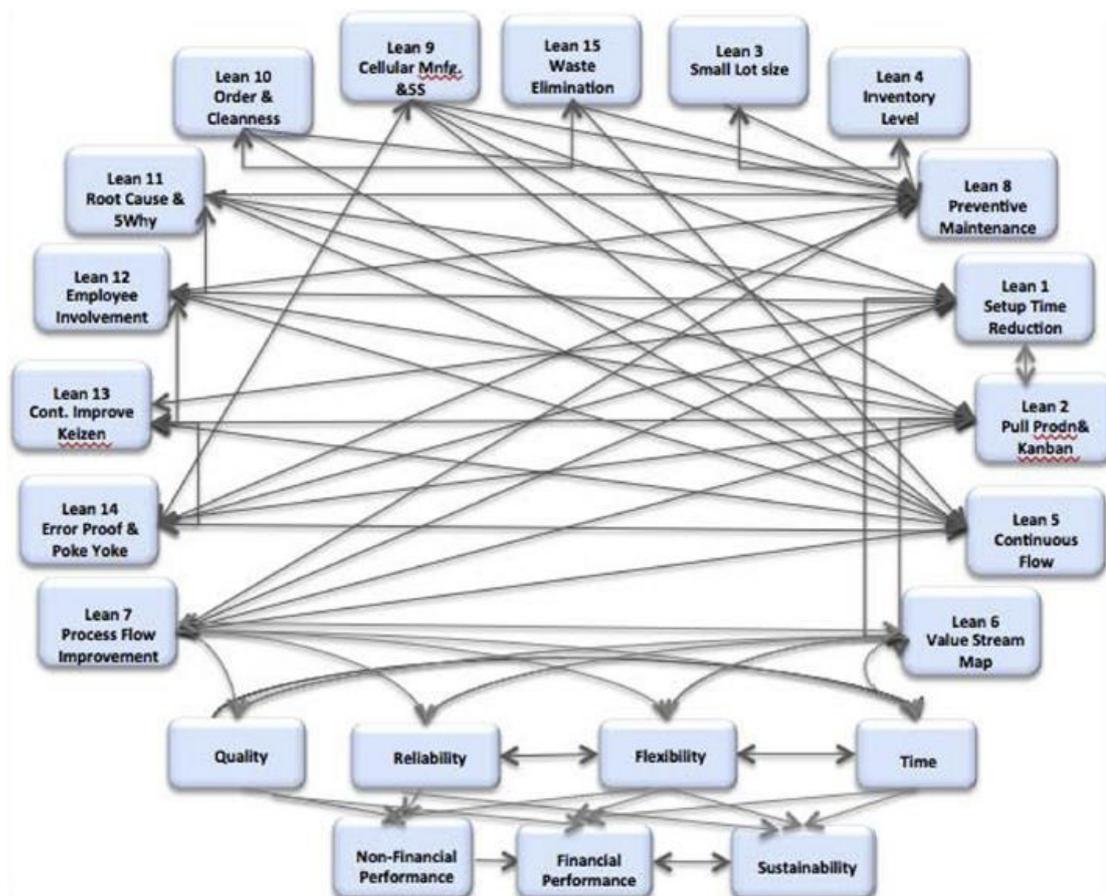


Abbildung 23: Der kausale Plan <sup>89</sup>

<sup>88</sup> Vgl. Büyüközkan, G. u.a., 2015, S. 6543 ff.

<sup>89</sup> Vgl. Ebenda, S. 6542.

Für die Ermittlung der Beziehungen zwischen den 15 Lean-Kriterien, vier Erfolgsvariablen und drei Entscheidungsvariablen wurden drei Supply chain Manager aus der Logistikindustrie miteinbezogen. Sie wurden damit beauftragt, mit Hilfe einer Einflussmatrix die Abhängigkeiten zwischen den Kriterien und Variablen zu bewerten. Das Ergebnis liefert den kausalen Plan (siehe Abbildung 23).

### III. Erstellen eines Bayesschen Plans

Durch Vereinfachung des kausalen Plans wird der Bayessche Plan erstellt. Dies geschieht durch Eliminierung oder Kombination der Kriterien.

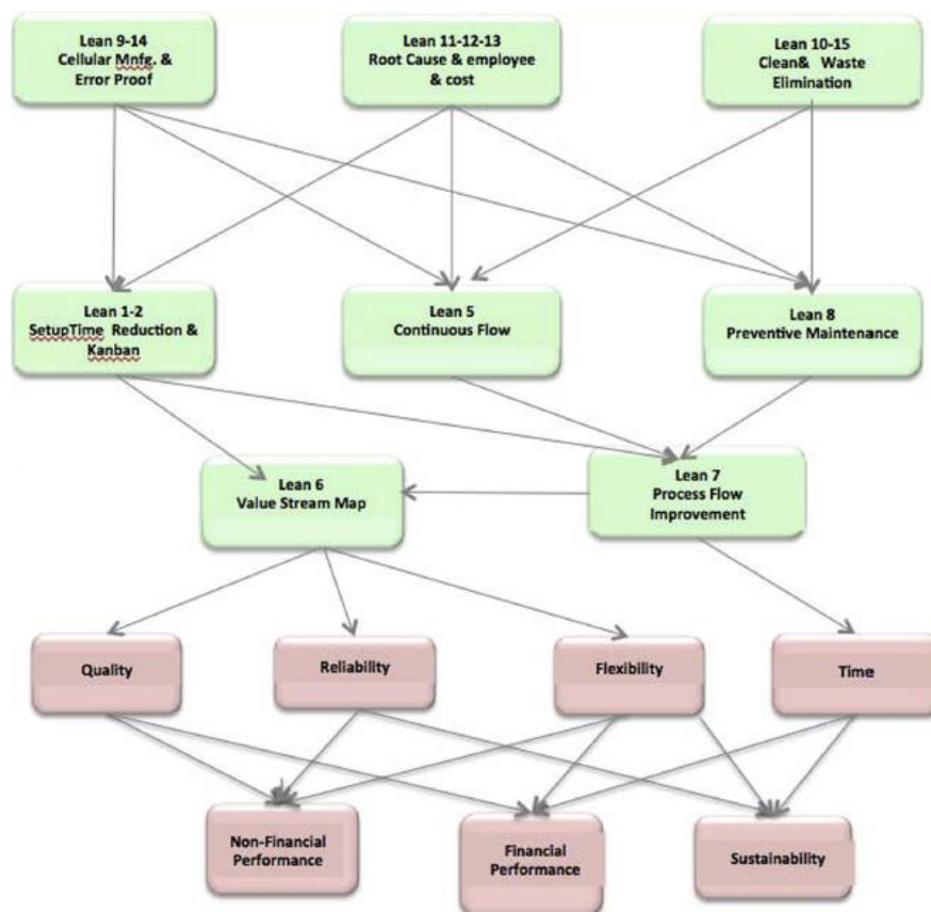


Abbildung 24: Der Bayessche Plan<sup>90</sup>

### IV. Vorbereitung der Abhängigkeitsmatrix

In diesem Schritt werden die CPTs der einzelnen Knoten befüllt.

### V. Szenarioanalysen

Durch die Szenarioanalyse sollen die Effekte der Lean-Kriterien auf die Qualität, Zuverlässigkeit, Flexibilität und Zeit dargelegt werden. Dafür werden drei verschiedene Szenarien (worst-case, best und average) eingeführt.

<sup>90</sup> Vgl. Ebenda, S. 6544.

### 2.4.5 Instandhaltungsentscheidung für Komponenten durch BN <sup>91</sup>

Hersteller haben Schwierigkeiten die Instandhaltung für Komponenten, die vom Kunden verwendet werden, auf Grund des unterschiedlichen und unkontrollierbaren Nutzerverhaltens vorherzusagen. Ein Komponentenmanager (part agent) sorgt dafür, dass der Anwender in seinen Instandhaltungsmaßnahmen unterstützt und die betrachtete Komponente durch seinen gesamten Lebenszyklus begleitet wird. Dabei werden alle Informationen über die betrachtete Komponente gespeichert und verwaltet.

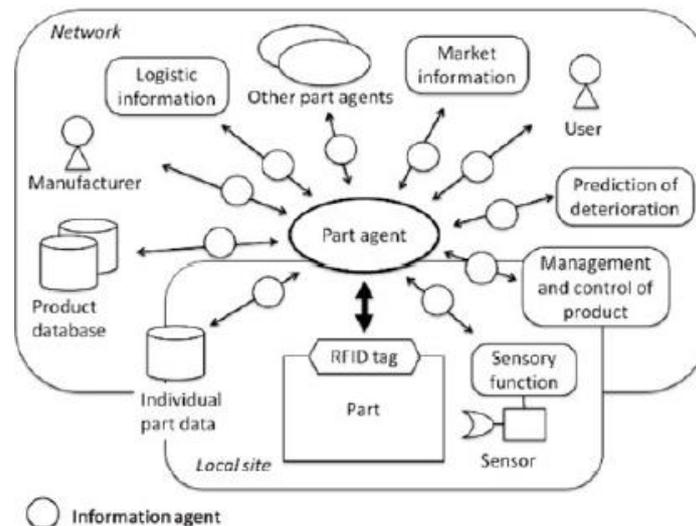


Abbildung 25: Der Komponentenmanager (part agent) <sup>92</sup>

Damit die zukünftigen Zustände der Komponente vorhergesagt werden können, wird das Lebenszyklusmodell auf eine Baumstruktur erweitert. Das erweiterte Lebenszyklusmodell beinhaltet damit mögliche Zustandsänderungen der Komponente während des Lebenszyklus.

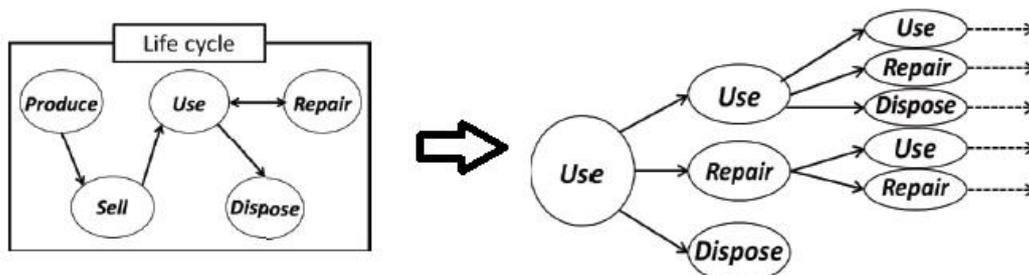


Abbildung 26: Die Lebenszykluserweiterung <sup>93</sup>

Der Komponentenmanager berechnet die Kennzahlen Nutzen, Kosten und Umweltnutzen, die für jeden zukünftigen Zustand (Verwendung, Reparatur oder Entsorgung) erwartet werden können, um den TPI <sup>94</sup> (total performance index) der zukünftigen Zustände zu berechnen. Über ein BN wird die Auftrittswahrscheinlichkeit der zukünftigen

<sup>91</sup> Vgl. Nanjo, K. u.a., 2015, S. 692 ff.

<sup>92</sup> Vgl. Ebenda, S. 693.

<sup>93</sup> Vgl. Ebenda, S. 694.

<sup>94</sup> Vgl. Kondoh, S. u.a., 2007, S. 372.

Zustände ermittelt. Durch den TPI und die Auftretswahrscheinlichkeiten der zukünftigen Zustände wird der Wert dieser Zustände bestimmt. Der Zustand mit dem höchsten Wert (Verwendung, Reparatur oder Entsorgung) wird dem Kunden vom Komponentenmanager vorgeschlagen.

## 2.4.6 Regeleinführung für die Echtzeit-Fehlerentdeckung vor dem Auftritt <sup>95</sup>

Damit die Fehlervorhersage, die essentiell für eine vorausschauende Instandhaltung ist, zuverlässig geschieht, wird eine Methodik mit BN-Grundlage zum Erlernen und Zuordnen von Fehleranzeichen und potentiellen Fehlerereignissen eingeführt. Die Methodik beinhaltet dabei die folgenden vier Schritte:

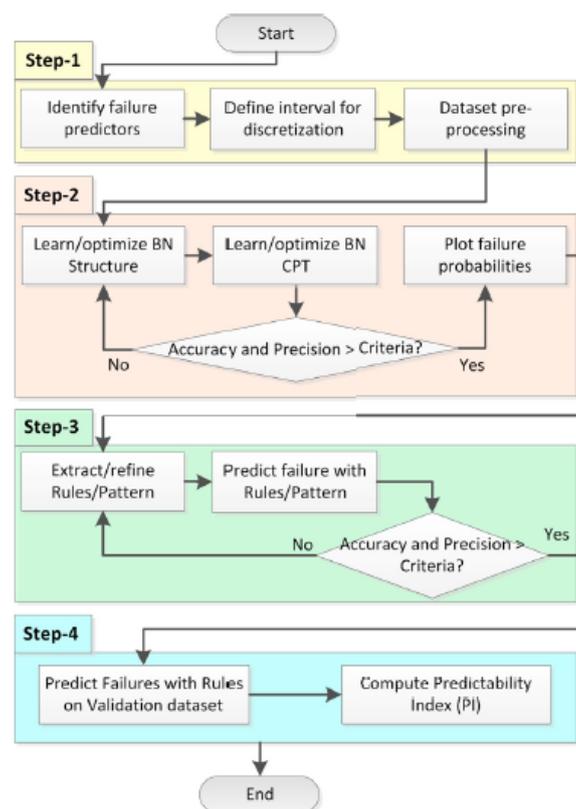


Abbildung 27: Methodik zur Fehlerentdeckung vor ihrem Auftritt <sup>96</sup>

### I. Schritt 1: Identifizieren von Prädiktoren

Die Prädiktoren (Kennzahlen die einen Beitrag zur Fehlerentdeckung leisten) werden aus dem Prozess der Herstellung, Qualitätsprüfung, Instandhaltung und Prozesssteuerung gewonnen. Für die Datenerfassung muss ein Zeitintervall definiert werden, da die Zielvariablen in der Datenbank entweder ereignisbasiert oder kontinuierliche Daten

<sup>95</sup> Vgl. Abu-Samah, A. u.a., 2015, S. 844 ff.

<sup>96</sup> Vgl. Ebenda, S. 845.

sind. Um die Ausfallwahrscheinlichkeit systematisch zu überwachen, wird das Zeitintervall diskretisiert. Der historische Datensatz wird in die zwei Teile BN-Lernen mit Extraktion der Regeln und Validierung unterteilt.

## II. Schritt 2: Erstellen des BN-Modells

In diesem Schritt wird die Struktur des BN erlernt bzw. optimiert und im Anschluss die CPTs berechnet. Die Struktur wird durch einen Lernalgorithmus erstellt, bei dem die Vorhersage- und Genauigkeitskriterien vom Endbenutzer definiert werden, um die erzeugte Struktur und ihre CPT zu validieren. Ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend, wird die BN-Struktur unter Verwendung anderer Lernalgorithmen weiter optimiert. Das endgültige BN-Modell wird dazu verwendet, um die Fehlerwahrscheinlichkeiten nach dem Testen des Datensatzes in den diskretisierten Zeitintervallen und für jeden einzelnen Fehlertyp getrennt zu plotten. Diese Diagramme werden für den Folgeschritt benötigt.

## III. Schritt 3: Ableiten von Mustern und Regeln

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus Schritt 2 werden analysiert, um ein gewisses Muster in den einzelnen Fehlertypen zu erkennen. Sollten keine Muster zu erkennen sein, werden Regeln aus den Diagrammen abgeleitet. Die Muster und Regeln werden für die Vorhersage von Fehlern verwendet. Danach wird überprüft, ob die Vorhersage den Benutzerkriterien entsprechen. Ist dies der Fall, kann der nächste Schritt eingeleitet werden.

## IV. Schritt 4: Validieren der Muster und Regeln

Die Muster und Regeln, die den Benutzerkriterien entsprechen, werden an den Validierungsdaten angewendet und ihre Eignung über die Kennzahlen Vorhersagegenauigkeit, Präzision und Vorlaufzeit geprüft.

### **2.4.7 Vorausschauende Instandhaltung für Mehrzustandssysteme <sup>97</sup>**

Während sich ein binäres System auf seine beiden Zustände beschränkt (z.B. einwandfreier oder vollständig fehlerhafter Zustand), berücksichtigt ein Mehrzustandssystem zusätzliche Zustände. In der Realität arbeiten Systemkomponenten in unterschiedlichen Stufen der Verschlechterung. Diese Verschlechterung kann bis zum völligen Versagen des Systems führen.

Es gilt einen Ansatz bzw. ein Entscheidungswerkzeug zu finden, um die optimale Richtlinie für eine vorausschauende Instandhaltung vorhersagen zu können. Dafür werden folgende Schritte getätigt:

---

<sup>97</sup> Vgl. Danioko, F. u.a., 2012, S. 60.

- I. Modellierung eines DBN und Befüllung der CPTs
- II. Definition der Regeln für den Übergang der Markow-Kette zum DBN
- III. Integration der Leistungsindikatoren für die Bewertung in DBN
- IV. Simulation des Ausrüstungsverhaltens
- V. Nutzung eines Lernalgorithmus zur Bestimmung des optimalen Levels der vorausschauenden Instandhaltung durch Simulation

### 2.4.8 Shopfloor-Datensammlung für eine vorausschauende Instandhaltung <sup>98</sup>

Damit die Unternehmen wettbewerbsfähig bleiben, werden Verfügbarkeit, Geschwindigkeit, Qualität und Zuverlässigkeit gesteigert und so die Ausrüstung an ihre Grenzen gebracht. Um diese Grenzen nicht zu überschreiten, wird ein optimiertes Instandhaltungsmanagement und eine korrekte Festlegung der Instandhaltungsintervalle benötigt. <sup>99</sup>

Für eine Festlegung der Instandhaltungsintervalle werden Analysewerkzeuge und ein Wahrscheinlichkeitsmodell auf Basis eines BN benötigt. Die Analysewerkzeuge bereiten die Rohdaten auf, damit diese für das Wahrscheinlichkeitsmodell geeignet sind. Das Wahrscheinlichkeitsmodell errechnet die Instandhaltungsintervalle. Diese werden dem Instandhaltungsmanager zur Unterstützung in seinen Entscheidungen bekanntgegeben.

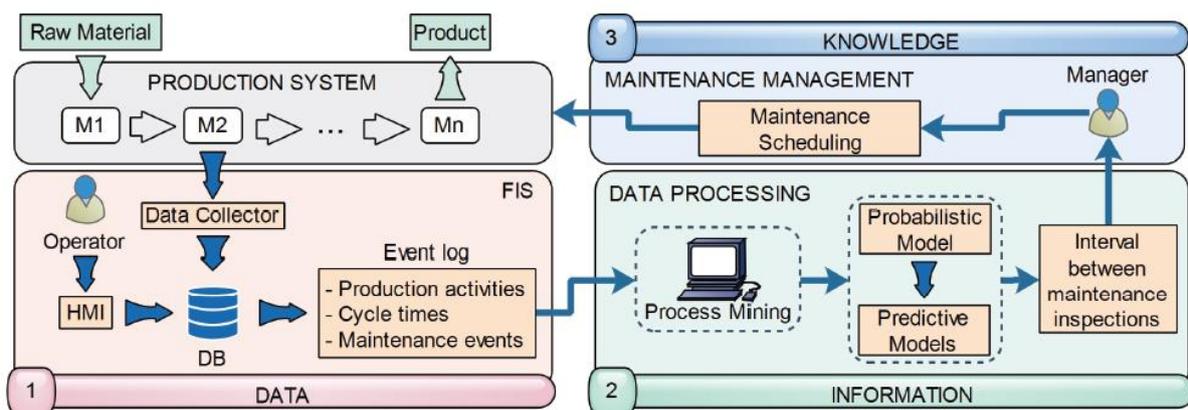


Abbildung 28: Das Modell zur Unterstützung des Instandhaltungsmanagements <sup>100</sup>

<sup>98</sup> Vgl. Ruschel, E. u.a., 2017, S. 1127 ff.

<sup>99</sup> Vgl. Mendes, A. A. u.a., 2014, S. 148.

<sup>100</sup> Vgl. Ruschel, E., 2017, S. 1128.

## 2.5 Anwendungen

In diesem Kapitel werden Anwendungen von BN im Kontext der Instandhaltung mit Hilfe von Forschungsarbeiten vorgestellt.

### 2.5.1 Halbleiter <sup>101</sup>

Die Halbleiterindustrie produziert eine Vielzahl von unterschiedlichen Produkten in geringen Stückzahlen, die außerdem einen kurzen Produktlebenszyklus besitzen. Diese Eigenschaften führen zu einer Erhöhung von unerwarteten Produktionsausfällen. Auf Grund dieser unvorhergesehenen Ausfälle soll eine Methodik basierend auf BN den Techniker bei der Wahl des Instandhaltungsverfahrens unterstützen.

Die Methodik wird an einer dielektrischen Werkstätte getestet, da diese durch häufige unerwartete Ausfälle als kritisch gilt. Die BN-Struktur wird über drei verschiedene Lernalgorithmen erstellt. Dabei werden lediglich 75% der vorhandenen Daten verwendet. Innerhalb der Struktur ist das Instandhaltungsverfahren der Zielknoten und von zentraler Bedeutung. Die übrigen Knoten werden von verschiedenen Alarmen, Warnungen und einem möglichen Fehler gebildet. Basierend auf den Zuständen der einzelnen Alarm- und Warnungsknoten wird das Instandhaltungsverfahren durch das BN vorgeschlagen. Die übrigen 25% der Daten werden für die Validierung des BN verwendet.

### 2.5.2 Turbine eines Kraftwerks <sup>102</sup>

Geplante Fusionskraftwerke benötigen für die Wiederaufladung der zentralen Magnetspule einen gepulsten Betrieb. Dieser gepulste Modus führt auch zu einem gepulsten Betrieb der Dampfturbine, obwohl diese Betriebsart nicht ideal für die Komponente ist.

Während für die Dampfturbine auf Basis von anderen Betriebsarten bereits Ausfallraten erhoben wurden, sind im gepulsten Betrieb noch keine Daten von Ausfallraten vorhanden. Deshalb wird eine Methode entwickelt, die die Ausfallraten von Komponenten auf Basis von unterschiedlichen Betriebsarten extrapoliert, indem der Einfluss des gepulsten Betriebsmodus auf die Turbine ermittelt wird.

Dazu wird ein Fehlerbaum für einen Turbinenausfall in dieser Betriebsbedingung entwickelt, welcher anschließend in ein BN umgewandelt wird. Auf diese Weise wird ein statistisches Modell für die Ausfallrate des Turbinensystems in Bezug auf die Ausfallraten der Teilkomponenten generiert.

---

<sup>101</sup> Vgl. Ben Said, A. u.a., 2016, S. 544 ff.

<sup>102</sup> Vgl. Dongiovanni, D. N. und Iesmantas, T., 2016, S. 613 ff.

### 2.5.3 Kompressor <sup>103</sup>

Der Radialgasverdichter einer Offshore-Anlage steigert den Druck des Gases durch Volumenreduktion. Ein Ausfall des Verdichters führt zu einer erheblichen Reduktion der Verfügbarkeit des gesamten Kraftwerkes. Eine erfolgreiche Einführung von zustandsorientierter (bzw. vorausschauender) Instandhaltung reduziert die Verluste durch den Ausfall einer Komponente.

Aus diesem Grund wird in einer Fallstudie eine Fehleranalysemethode, die auf einem BN und den Daten von Sensoren beruht, erprobt, die sich in Fehleridentifizierung, Schlussfolgerung und Sensibilitätsanalyse gliedert.

### 2.5.4 Schweißsteuergerät <sup>104</sup>

Harms & Wende erzeugt Schweißausrüstung für den globalen Markt. Um den Kunden bei ihren Problemen zu helfen, stehen permanent drei Servicetechniker in der telefonischen Hotline zur Verfügung. Durch eine Anwendung von OOBNs für die Gesundheitsüberwachung und Ursachenanalyse der Schweißsteuerung erhofft sich Harms & Wende die Belastung und den Schulungsumfang der Servicemitarbeiter zu reduzieren. Außerdem wird das vorhandene OOBN-Modell durch eine zukünftige Erweiterung zu einem dynamischen Modell (DBN) in der Lage sein, für eine vorausschauende Instandhaltung zu sorgen.

### 2.5.5 Laststufenschalter <sup>105</sup>

Viele Länder besitzen eine alternde Stromverteilungsinfrastruktur, für die eine Messung der Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen immer wichtiger wird. Ein realistisches Instandhaltungsmodell, welches den Einfluss der Instandhaltung auf den Zustand der Stromverteilungsinfrastruktur ermittelt, verbessert bzw. erweitert die vorhandenen Instandhaltungsstrategien.

Um die Komplexität des Modells zu reduzieren, wird der Laststufenschalter (OLTC) eines Transformators herangezogen. Der OLTC ist eine wichtige Komponente des Transformators, da er eine bedeutende Fehlerquelle darstellt. Durch die Verwendung von BN wird ein risikobasiertes Instandhaltungswerkzeug zur Entscheidungsfindung entwickelt.

---

<sup>103</sup> Vgl. Jun, H.-B. und Kim, D., 2017, S. 332 ff.

<sup>104</sup> Vgl. Madsen, A. L. u.a., 2017, S. 132 ff.

<sup>105</sup> Vgl. Sand, K. u.a., 2010, S. 530 ff.

### 2.5.6 Zugkontrollsystem <sup>106</sup>

Das Steuerungssystem eines Hochgeschwindigkeitszuges ist komplex und in Echtzeit. Ein Ausfall dieses Systems führt zu einer Verschlechterung der Leistung, Verringerung der wahrgenommenen Qualität und Erhöhung der Kosten. Ein BN ermöglicht eine Fehlerdiagnose und Instandhaltung des Steuerungssystems und verhindert somit die negativen Auswirkungen eines Systemausfalls.

Das BN wird automatisch durch einen Lernalgorithmus aus einer Fehlertabelle erstellt. Im Anschluss wird der Fehler, welcher am Wahrscheinlichsten für den Zustand des Steuerungssystems ist, gesucht. Zu guter Letzt wird ein DBN aus dem Instandhaltungsmodell abgeleitet, um ein Modell auf Echtzeitbasis zu erhalten.

### 2.5.7 Gebläse einer Limonadenproduktionslinie <sup>107</sup>

Für immer komplexer werdende Industriesysteme fällt es schwer, Instandhaltungsstrategien zu definieren, die die Gesamtleistung von Unternehmen in Bezug auf Produktion, Qualität, Sicherheit und Umwelt deutlich verbessern. Das Verhalten von Systemen, deren Zustand sich mit der Zeit verschlechtert, hängt mit dem Zustand seiner Komponenten zusammen. Der verfolgte Ansatz auf Basis eines DBN modelliert das System und die funktionalen Abhängigkeiten der Komponenten.

Die Analyse anhand des realen Fallbeispiels „Gebläse einer Limonadenproduktionslinie“ liefert als Ergebnis die am besten geeignete Instandhaltungsmaßnahme für den vorhandenen Zustand des Systems.

### 2.5.8 Schneidwerkzeug einer CNC-Maschine <sup>108</sup>

Für die Verbesserung von Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit in industriellen Systemen spielt die Instandhaltungsaktivität eine große Rolle. In den neuesten Anwendungen wird der Zustand des Industriesystems durch Sensoren überwacht und die gespeicherten Daten dazu verwendet, den Gesundheitszustand des betrachteten Systems zu bewerten. In diesem Fall stellt das betrachtete System ein Schneidwerkzeug einer CNC-Maschine dar, dessen Zustand durch die Nutzung von DBN beurteilt wird.

Dabei werden die Überwachungsdaten der Sensoren in Verhaltensmodelle umgewandelt, in denen selbst die Verschlechterung des Zustandes berücksichtigt wird. Die Modelle werden zur kontinuierlichen Aufnahme des derzeitigen Zustandes verwendet und bieten so die Möglichkeit, die verbliebene sinnvolle Lebenszeit des Schneidwerkzeuges zu berechnen.

---

<sup>106</sup> Vgl. Cheng, Y. u.a., 2013, S. 1753 ff.

<sup>107</sup> Vgl. Adjerid, S. u.a., 2012, S. 82 ff.

<sup>108</sup> Vgl. Tobon-Mejia, D. A. u.a., 2012, S. 167 ff.

## 2.5.9 Arbeitsplätze und Shuttle <sup>109</sup>

In Datenbanken von Unternehmen befinden sich oftmals eine Vielzahl an Informationen über deren Wartungstätigkeiten, die jedoch schlecht genutzt werden. Ein Aufbau und die effiziente Nutzung einer Wartungshistorie wird die Implementierung von Instandhaltungsstrategien erleichtern.

Durch das Fallbeispiel (Arbeitslinie mit vier Arbeitsplätzen und einem mobilen Shuttle) soll ein Modell erstellt werden, das eine Entscheidungshilfe zur Wahl der idealen vorausschauenden Instandhaltungsstrategie darstellt.

## 2.6 Der Produktionsprozess als Fallbeispiel

Im praktischen Teil dieser Diplomarbeit wird untersucht, ob mit der Hilfe eines BN eine vorausschauende Instandhaltung in den Produktionsablauf integriert werden kann. Um eine Eignung nachzuweisen, wird ein realer stationärer Produktionsprozess eines Kosmetikunternehmens betrachtet, welcher sich wie folgt darstellt:

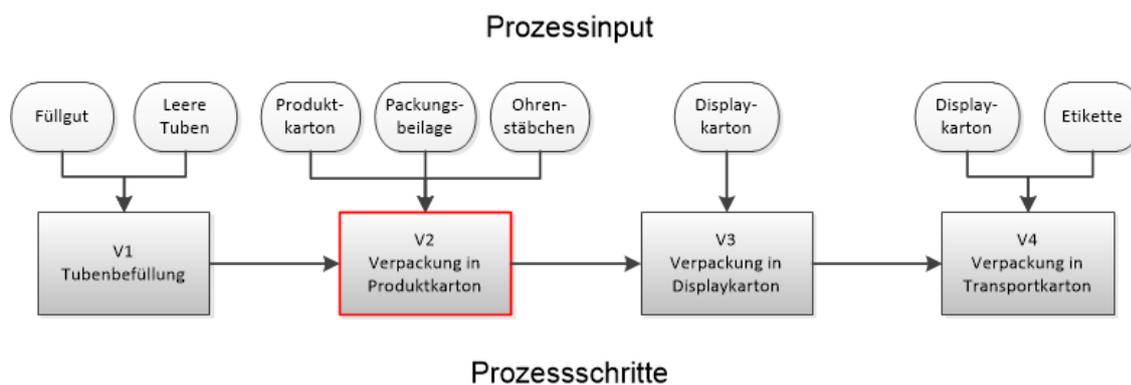
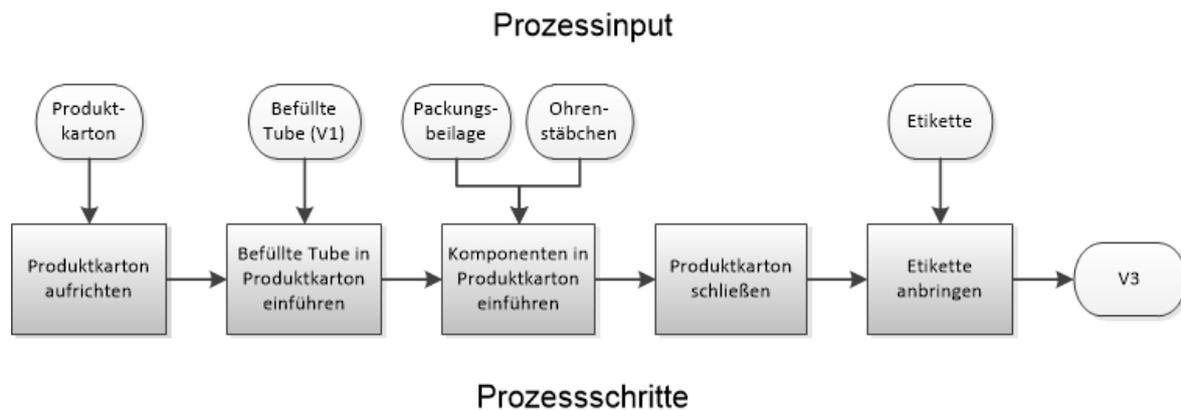


Abbildung 29: Fallbeispiel, der Produktionsprozess

Der Produktionsprozess ist dabei in vier Unterprozesse gegliedert. Bei der Tubenfüllung V1 wird das Füllgut in die leeren Tuben gefüllt. Anschließend werden über eine Gewichtsüberprüfung die fehlerhaft befüllten Tuben aussortiert. Beim Prozess Verpackung in den Produktkarton V2 wird der Produktkarton zunächst aufgerichtet, die befüllte Tube mit einer Packungsbeilage und einem Ohrenstäbchen (bei bestimmten Produkten, dieser Prozessschritt kann zu und abgeschaltet werden) in diesen eingeführt und danach verschlossen. Anschließend wird ein Etikett auf die Verpackung aufgebracht. Die befüllten Produktkartons kommen in einen Displaykarton V3. Der Prozessschritt V4 gibt die Displaykartons in Transportkartons.

<sup>109</sup> Vgl. Duta, L., 2012, S. 387 ff.

Für das Fallbeispiel im praktischen Teil der Diplomarbeit wird dabei lediglich der Unterprozess V2 (Verpackung in den Produktkarton) betrachtet. Dieser kann abermals in die einzelnen Prozessschritte untergliedert werden:



**Abbildung 30: Prozessschritte V2**

In der Produktionsanlage werden die Maschinenzustände und die einzelnen Fehlerzustände der Prozessschritte automatisch in einer Historienliste aufgezeichnet. Außerdem werden die Stückzahlen vor (über die Gewichtsüberprüfung / Checkweigher) und nach (über einen Stückzähler) dem Unterprozess V2 aufgenommen. Fehlerhafte Produkte werden im Prozess V2 ausgeschieden.

## 2.7 Zusammenfassung und SWOT-Analyse

Aus dem Stand der Technik und den Anwendungen gilt es die markanten Eigenschaften und Merkmale herauszufiltern, um das Verbesserungspotential der bereits vorhandenen Methoden zu identifizieren.

Die Modelle ermöglichen eine Abbildung und Analyse von komplexen Systemen, wobei eine Visualisierung der kausalen Beziehungen zur Berücksichtigung von ebenenübergreifenden Abhängigkeiten führt.<sup>110</sup>

Der BN-Ansatz kann große Mengen von (Sensor)daten interpretieren und bietet somit eine geeignete Grundlage für die Ermittlung der idealen vorausschauenden Instandhaltungsmaßnahme.<sup>111</sup>

Die Eignung eines BN für die Entscheidungsfindung bei Instandhaltungsproblemstellungen ist durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen nachgewiesen. Die vorgestellten Modelle sind allerdings eindimensional in ihrer Betrachtung. Die Modelle,

<sup>110</sup> Vgl. Sand, K., 2010, S. 535.

<sup>111</sup> Vgl. Jun, H.-B., 2017, S. 347.

die auf die Fehlervorhersage spezialisiert werden, inkludieren die Umwelt des Systems nicht.<sup>112</sup>

Bei den Modellen, die zum Finden der optimalen Instandhaltungsstrategie dienen, wird der eigentliche Instandhaltungsprozess nicht berücksichtigt (z.B. Instandhaltbarkeit nicht berücksichtigt). Die optimale Instandhaltungsstrategie wird nicht auf ihre Machbarkeit überprüft.<sup>113</sup>

Einige Modelle beschränken sich auf den stationären Anwendungsfall und lassen die Flexibilität vermissen. Diese Eigenschaft ist bei instationären Systemen gegeben.<sup>114</sup>

In den Modellen wird ein sich verschlechternder Zustand der Komponente nicht berücksichtigt. Dies führt zu einem ungenauen Ergebnis.<sup>115</sup>

Oftmals bedarf es einer Verfeinerung der Modelle, um stets das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die angestrebte Verfeinerung garantiert allerdings nicht, dass sich die verwendeten Methoden für alle Anwendungsfälle eignen.<sup>116 117</sup>

Die Modelle werden zur Fehlerschlussfolgerung verwendet und schlagen eine optimale Lösung für einen eingetretenen Fehler vor. Eine zuverlässige Fehlervorhersage wirkt präventiv und bietet die Möglichkeit, das Eintreten eines Fehlerstatus zu vermeiden.<sup>118</sup>

Um die zuvor diskutierten Punkte in strukturierter Form präsentieren zu können, wird eine SWOT-Analyse angefertigt. Diese teilt die Eigenschaften sowohl in Chancen/Gefahren als auch Stärken/Schwächen ein.

---

<sup>112</sup> Vgl. Gruber, A., 2013, S. 382.

<sup>113</sup> Vgl. Ben Said, A., 2016, S. 548.

<sup>114</sup> Vgl. Ansari, F., 2017, S. 7.

<sup>115</sup> Vgl. Nanjo, K., 2015, S. 696.

<sup>116</sup> Vgl. Abu-Samah, A., 2015, S. 850.

<sup>117</sup> Vgl. Ruschel, E., 2017, S. 1134.

<sup>118</sup> Vgl. Abu-Samah, A., 2015, S. 851.

SWOT-ANALYSE		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Externe Analyse	Chancen (Opportunities)	Die Modelle ermöglichen eine Abbildung und Analyse von komplexen Systemen.	Die Konzentration auf Instandhaltung führt zu einer eindimensionalen Betrachtung, die andere wichtige Kennzahlen in den Hintergrund drängt.
		Durch die Abbildung der kausalen Beziehungen werden ebenenübergreifende Abhängigkeiten im Modell berücksichtigt.	Die Modellierung von stationären Systemen berücksichtigt keine Änderung des betrachteten Systems.
		Die Datenmenge als Grundlage der diskutierten Herangehensweisen ist in ihrer Größe nicht eingeschränkt.	Der sich verschlechternde Zustand von Komponenten ist in einigen Modellen nicht integriert.
		Die Eignung der Anwendung eines BN für das Thema Instandhaltung ist nachgewiesen.	
	Gefahren (Threats)	Durch die Methode werden klare Regeln vorgegeben, die bei einer Verwendung gleichbedeutend mit gewissen Beschränkungen sind.	Um eine Lösung für bestimmte Ausnahmesituationen zu generieren, gilt es die Modelle noch zu verfeinern.
			Die Modelle sind nicht für alle Anwendungsfälle geeignet.
			In den vorhandenen Modellen wird die ideale Instandhaltungsstrategie gesucht, ohne den eigentlichen Instandhaltungsprozess zu behandeln.

Abbildung 31: SWOT-Analyse zur Stand der Technik und Anwendungen

Im Kapitel 3 wird eine neue Methode vorgestellt. Für diese gilt es die Gefahren bzw. Schwächen der zuvor diskutierten Methoden in Chancen bzw. Stärken umzuwandeln.

### 3 Erstellung eines Bayesschen Netzwerkes für eine vorausschauende Instandhaltung auf KPI-Basis

In diesem Kapitel folgt die Eignungsprüfung des BN für eine vorausschauende Instandhaltung mit der Hilfe von KPIs. Dafür wird ein Produktionsprozess als Fallbeispiel herangezogen (siehe Kapitel 2.6), von dem sowohl die Maschinen- und Fehlerzustände zu den einzelnen Zeitpunkten als auch die Stückzahlen vor und nach dem betrachteten Produktionsprozess V2 bekannt sind. Diese werden automatisch in einer Historienliste aufgezeichnet. Um aus dieser Historienliste ein BN sowohl manuell als auch automatisch zu generieren, wird die Vorgehensweise aus Abbildung 32 verfolgt:

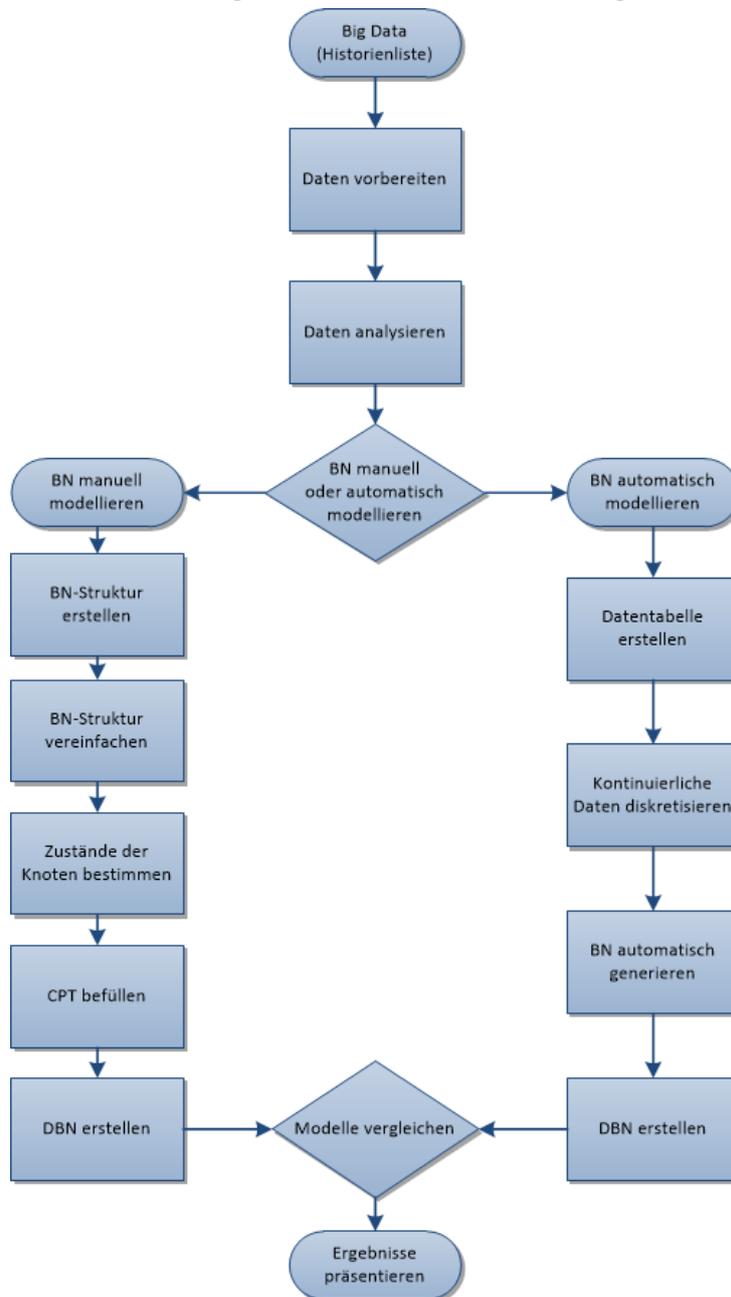


Abbildung 32: Flussdiagramm für die Erstellung des BN

Die Daten aus der Historienliste dienen als Grundlage für die zu erstellenden Modelle. Diese werden zunächst für die weiteren Schritte vorbereitet. Im Anschluss wird die Gewinnung von zusätzlichen Informationen durch eine Analyse der Daten angestrebt. Die Gesamtheit an Informationen wird dazu verwendet, um ein BN-Modell sowohl manuell als auch automatisch mit der Software GeNIe SMILE zu generieren. Diese beiden Modelle bilden die Basis für eine in den Produktionsprozess integrierte vorausschauende Instandhaltung.

Die manuelle Erstellung eines BN beginnt mit der Bildung einer Struktur. Dabei werden die Knoten definiert und deren kausalen Beziehungen abgebildet. Durch diesen Vorgang werden Knoten und Knotengruppierungen sichtbar, die keinerlei Verbindung mit den essentiellen Knoten des Modells aufweisen. Diese werden durch eine Strukturvereinfachung aus dem Modell ausgeschieden. Im Anschluss werden die Zustände der einzelnen Knoten bestimmt. Die Zustandsbestimmung ermöglicht eine Befüllung der CPT, welche dazu führt, dass die Wahrscheinlichkeiten der Zustände eines jeden einzelnen Knoten berechnet werden. Durch die Einführung einer Zeitkomponente wird aus dem manuell erstellten BN ein DBN erzeugt, welches Variablen auf Grundlage verschiedener Zeitpunkte in Relation setzen lässt.

Die automatische Erstellung eines BN wird durch eine strukturierte Datentabelle, die alle relevanten Daten in sich birgt, ermöglicht. Kontinuierliche Daten werden für die Verwendung des Lernalgorithmus diskretisiert, um in weiterer Folge das BN automatisch zu generieren. Durch die Einführung einer Zeitkomponente wird aus dem automatisch erstellten BN ein DBN erzeugt.

Die beiden erstellten Modelle werden verglichen, indem verschiedene Kriterien kritisch betrachtet werden. So soll die Eignung der beiden Methoden für verschiedene Anwendungsfälle überprüft werden.

## 3.1 Datenvorbereitung

Das BN beruht auf den Daten eines Produktionsprozesses, welcher in Kapitel 2.6 beschrieben ist.

### 3.1.1 Historienliste

Während des Prozessablaufes wird sowohl die Änderung des Maschinenzustandes als auch das Auftreten eines Fehlerzustandes in einer Historie (Auszug der Historie siehe Tabelle 5) aufgelistet und abgespeichert. Außerdem werden die absolut produzierten Stückzahlen periodisch aufgezeichnet.

ID	dt_data	Entry ID	flags	Machine ID	Value ID	Value	Client IP
96943	31.07.2017 09:08:14	0	1	103	200	16	91.141.1.138
96944	31.07.2017 09:13:22	0	1	103	200	0	91.141.1.138
97327	31.07.2017 12:14:09	0	1	103	200	16	77.119.130.153
97328	31.07.2017 12:18:33	0	1	103	200	0	77.119.130.153
97330	31.07.2017 12:22:00	0	1	103	103	10274774	77.119.130.153
97331	31.07.2017 12:23:00	0	1	103	103	10274829	77.119.130.153
97713	31.07.2017 17:52:56	0	1	103	210	2057	178.165.128.131
97717	31.07.2017 18:35:39	0	1	103	210	2057	178.165.128.131
97722	01.08.2017 06:58:45	0	1	103	213	512	178.165.128.131
97723	01.08.2017 06:58:56	0	1	103	210	0	178.165.128.131
97724	01.08.2017 06:59:05	0	1	103	211	32	178.165.128.131

**Tabelle 5: Auszug aus der Historie des Produktionsprozesses**

Die Daten der Historienliste werden analysiert, um sie für das BN gewinnbringend einsetzen zu können. Dafür werden die Einträge bestimmter Spalten benötigt, welche im Folgenden beschrieben werden:

- Die ID stellt eine fortlaufende Nummer dar, die eine Zeile der Historie eindeutig definiert.
- Die dt\_data-Spalte beinhaltet das Datum und die Uhrzeit des Auftretens eines gewissen Zustandes oder die Änderung des vorangegangenen Zustandes.
- Die Machine ID ordnet die Historienzeile der zu betrachteten Maschine (den betrachteten Prozess) zu. Im Fallbeispiel handelt es sich stets um die Maschine / den Prozess 103.
- Die Value ID beschreibt, ob es sich um einen aufgezeichneten Maschinenzustand bzw. Fehlerzustand oder eine Stückzahlaufzeichnung handelt.
- Value beschreibt den Zustand beim Auftreten einer Maschinenzustands- oder einer Fehlerzustandsaufzeichnung. Bei einer Stückzahlaufzeichnung wird die kumulierte Stückzahl aufgezeichnet.
- Die Client IP führt die zum Zeitpunkt des Historieneintrages zuständige Person für den Produktionsprozess an.

### 3.1.2 Maschinen-, Fehlerzustand und Stückzahlaufzeichnung

In der Historienliste werden Maschinenzustände, Fehlerzustände und Stückzahlaufzeichnungen gleichermaßen aufgelistet. Die Value ID bestimmt, ob es sich bei den Zeilen der Historienliste um einen Maschinen- bzw. Fehlerzustand oder eine Stückzahlaufzeichnung handelt:

- Maschinenzustände besitzen die Value ID 200.
- Fehlerzustände besitzen die Value ID 210, 211, 212, 213 oder 214.
- Stückzahlaufzeichnungen besitzen die Value ID 103.

Die Value ID ermöglicht somit eine Unterscheidung zwischen dem Typ Maschinenzustand, Fehlerzustand und Stückzahlaufzeichnung. Es kann allerdings auf Grund der Value ID keine Aussage getroffen werden, um welchen Maschinen- bzw. Fehlerzustand es sich handelt.

### 3.1.3 Definition der Maschinen- und Fehlerzustände

Der Produktionsprozess weist zu den betrachteten Zeitpunkten bestimmte Maschinen- bzw. Fehlerzustände auf. Diese werden tabellarisch erläutert.

#### 3.1.3.1 Maschinenzustände

Im Produktionsprozess können folgende Maschinenzustände auftreten:

ID	MachineID	valueID	Value	Beschreibung
25	103	200	0	Maschine aktiviert
26	103	200	1	Maschine aus
27	103	200	16	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)

**Tabelle 6: Mögliche Maschinenzustände im Produktionsprozess**

#### 3.1.3.2 Fehlerzustände

Die Fehlerzustände sind in fünf verschiedene Kategorien unterteilt. Der Grund dafür wird in Kapitel 3.1.5 beschrieben.

Für die weitere Vorgehensweise werden zwei Platzhalter (\* und X) für die Spalte Value eingeführt, um allgemeine Fälle beschreiben zu können.

Ein \* in der Spalte Value steht für einen undefinierten Bitwert. Daher fasst das Symbol \* der Spalte Value alle undefinierten Fehlerzustände zusammen. Als *Beispiel* dient die Value 2057 (mit der Value ID 210) in Tabelle 5. Diese ist in der Tabelle 7 nicht definiert und wird dem Symbol \* (für die Value ID 210) zugewiesen.

Wird in weiterer Folge ein allgemeiner Maschinen- oder Fehlerzustand beschrieben, so findet der Platzhalter X seine Verwendung. *Beispiel:* So bedeutet das X als Value-

wert mit einer zugehöriger Value ID von 210 einen Fehlerzustand M1 des Produktionsprozesses. Dies kann sowohl ein definierter Fehlerzustand als auch ein undefinierter Fehlerzustand (\*) sein.

Im Produktionsprozess können folgende Fehlerzustände auftreten:

ID	MachinelD	valueID	Value	Beschreibung
28	103	210	1	NOT-AUS EIN
29	103	210	2	KEINE DRUCKLUFT
30	103	210	4	TÜRE OFFEN
31	103	210	8	MOTOR-SCHUTZ AUSGELOEST
32	103	210	16	UMRICHTER "HAUPTMOTOR" STOERUNG
33	103	210	32	FREQUENZREGLER UEBERLASTUNG (OPTIONAL)
34	103	210	64	UEBERLAST PRODUKT-EINSCHUB
35	103	210	128	UEBERLAST BECHERKETTE
36	103	210	256	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE
37	103	210	512	ZU VOLL AUSLAUFSTAU
38	103	210	1024	24V SPANNUNG FEHLT
39	103	210	2048	MIN. NIVEAUSTAND KARTONMAGAZIN
40	103	210	4096	KARTON MAGAZIN LEER
41	103	210	8192	FEHLER KARTONOEFFNER
42	103	210	16384	OBERE FUEHRUNG GEOFFNET
43	103	210	32768	UMRICHTER "UEBERGABE" STOERUNG
44	103	210	0	Kein Fehler bei M1 aktiv!
45	103	210	*	Kein Bitwert zugeordnet

**Tabelle 7: Definition der Fehlerzustände M1**

ID	MachinelD	valueID	Value	Beschreibung
46	103	211	1	BEDIENER SICHERHEITSALARM
47	103	211	2	MASCHINE NICHT IN POSITION FUER TIPPBETRIEB PRODUKT-UEBERGABE
48	103	211	4	OBERE FUEHRUNG STOERUNG
49	103	211	8	TIME OUT ZYLINDER GERADERICHTER
50	103	211	16	PRODUKT-UEBERGABE AUSGESCHALTET
51	103	211	32	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE
52	103	211	64	EINLAUFSTAU IN WARTESTELLUNG
53	103	211	128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF
54	103	211	256	PARAMETER-FEHLER FUER GESCHWINDIGKEITSREDUZIERUNG
55	103	211	512	TIPPTASTER GESTECKT
56	103	211	1024	MASCHINEN ENCODER NULLSTELLUNG DURCHFÜHREN - MAN. ZYKLUS
57	103	211	2048	TIME OUT ZYLINDER EINGABESCHACHT
58	103	211	4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER
59	103	211	8192	ALARM PRODUKTSTAU AM EINLAUFSBAND
60	103	211	16384	PRODUKT-UEBERGABE NICHT IN POSITION
61	103	211	32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET
62	103	211	0	Kein Fehler bei M2 aktiv!
63	103	211	*	Kein Bitwert zugeordnet

**Tabelle 8: Definition der Fehlerzustände M2**

ID	MachinelD	valueID	Value	Beschreibung
64	103	212	1	SPS BATTERIE FEHLER!
65	103	212	2	KARTON-ABSAUGUNG OHNE PRODUKT EINGESCHALTET - TEST
66	103	212	4	KARTONANSAUGUNG EINSCHALTEN FUER AUTOMATIK BETRIEB
67	103	212	8	VAKUUM PUMPE FUER PROSPEKT AUSGESCHALTET
68	103	212	16	TEST LEHRLAUF BETÄTIGT! - OPTIONAL
69	103	212	32	STAEBCHEN EINGABE AUSGESCHALTET JE NACH FORMAT
70	103	212	64	PROSPEKT ABSAUGUNG AUSGESCHALTET
71	103	212	128	PROSPEKT KONTROLLE AUSGESCHALTET
72	103	212	256	GERADERICHTER RUECKLAUF NICHT ZEITGERECHT ERFOLGT
73	103	212	512	KEIN PROSPEKT IN EINSCHUBSCHACHT
74	103	212	1024	FEHLER PROSPEKTABZUG
75	103	212	2048	PROSPEKT MAGAZIN LEER
76	103	212	4096	MIN. NIVEAUSTAND PROSPEKT MAGAZIN
77	103	212	8192	HOME AKSENSTELLE DOSIERER FOERDERUNG FEHT, START DRUECKEN
78	103	212	16384	SCHNELLEINSTELLUNG FEHLER BEI STAEBCHEN FOERDERUNGSAKSE
79	103	212	32768	VON SEITE HOME/TIPPSCHALTER AKSE AUSTRETEN M ZU BEWEGEN
80	103	212	0	Kein Fehler bei M3 aktiv!
81	103	212	*	Kein Bitwert zugeordnet

Tabelle 9: Definition der Fehlerzustände M3

ID	MachinelD	valueID	Value	Beschreibung
82	103	213	1	FUHLER SICHERHEIT OBERE FUHRUNG STABCHEN
83	103	213	2	ALL. 50(49)
84	103	213	4	FOERDERUNGSAKSE STEUERUNG NICHT STARTBEREIT
85	103	213	8	ALL. 52(51)
86	103	213	16	ALL. 53(52)
87	103	213	32	STEUERUNG KONTROLL KARTE NICHT BEREIT
88	103	213	64	WARTEZEIT ZU LANG HOME SEQUENZ STAEBCHEN TRANSPORTAKSE
89	103	213	128	ALL. 56(55)
90	103	213	256	ALL. 57(56)
91	103	213	512	ALL. 58(57)
92	103	213	1024	NULLEINSTELLUNG LAUFEND, BITTE WARTEN...
93	103	213	2048	SCHACHT AUSSER LAGE
94	103	213	4096	WAHL TASTE ABDECKUNGSSICHERHEIT AUSGESCHLOSSEN
95	103	213	8192	AUSLAUFSTATION ABDECKUNGEN AUSGESCHALTET - OPTIONAL
96	103	213	16384	TIME OUT ZYLINDER STAEBCHEN AUSWURFKLAPPE
97	103	213	32768	PROSPEKT IM UEBERGABE BLOCKIERT
98	103	213	0	Kein Fehler bei M4 aktiv!
99	103	213	*	Kein Bitwert zugeordnet

Tabelle 10: Definition der Fehlerzustände M4

ID	MachinelD	valueID	Value	Beschreibung
100	103	214	1	PRODUKT BEI AUSLAUFSCHIEBER BLOCKIERT
101	103	214	2	SIGNAL NACHGESCHALTETE MASCHINE AUS
102	103	214	4	TIME OUT ZYLINDER STAEBCHEN ENTNAHME
103	103	214	8	EINFUEHRUNGPROBELAUF STAEBCHEN EIN
104	103	214	16	STAEBCHEN ENTNAHME NICHT ZEITGERECHTER RUECKLAUF
105	103	214	32	STAEBCHEN FEHLT AUF RIEMEN IN SCHACHTSTATION
106	103	214	64	HILFSTROMKREIS 90° SCHIEBER AM AUSLAUF FEHLT
107	103	214	128	STAEBCHEN MIN.FUELLSTAND IM TRICHTER
108	103	214	256	ALARM ETIKETTIERMASCHINE
109	103	214	512	ETIKETTE NICHT RICHTIG GEKLEBT
116	103	214	0	Kein Fehler bei M5 aktiv
117	103	214	*	Kein Bitwert zugeordnet

Tabelle 11: Definition der Fehlerzustände M5

### 3.1.4 Einführung des Primärschlüssels Zustand-ID

Die Zeilen der Historienliste sollen den Maschinen- und Fehlerzuständen eindeutig zugeordnet werden. Für eine eindeutige Zuordnung wird ein Primärschlüssel benötigt. Zunächst wird untersucht, ob sich die Spalte Value ID und die Spalte Value als Primärschlüssel eignen. Dazu wird eine Zeile der Historienliste exemplarisch herangezogen:

ID	dt_data	Entry ID	flags	Machine ID	Value ID	Value	Client IP
96944	31.07.2017 09:13:22	0	1	103	200	0	91.141.1.138

**Tabelle 12: Exemplarische Zeile der Historienliste zur Primärschlüsselüberprüfung**

Die Value ID beschreibt lediglich die Zugehörigkeit der einzelnen Zeilen der Historienliste zum Typ Maschinen- bzw. Fehlerzustand oder Stückzahlzeichnung, beschreibt aber nicht den aufgetretenen Maschinen- bzw. Fehlerzustand:

**Tabelle: Historie**

ID	dt_databaseentry	dt_data	EntryID	flags	MachineID	ValueID	Value	ClientIP
96944	31.07.2017 09:14	31.07.2017 09:13:22	0	1	103	200	0	91.141.1.138

**Mögliche Zustände bei der Zuordnung über die Value ID:**

ID	MachineID	valueID	Value	Beschreibung
25	103	200	0	Maschine aktiviert
26	103	200	1	Maschine aus
27	103	200	16	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)

**Abbildung 33: Überprüfung der Eignung der Spalte Value ID als Primärschlüssel**

Die Spalte Value zeigt bei Maschinen- bzw. Fehlerzuständen an, um welchen Maschinen- bzw. Fehlerzustand es sich handelt. Dabei wird der sogenannte Bitwert in die Spalte Value eingetragen, der den einzelnen Maschinen- bzw. Fehlerzuständen zugeordnet ist.

Die Spalte Value reicht jedoch nicht aus, um die Zeile der Historienliste eindeutig zuzuordnen zu können, da bestimmte Bitwerte für Maschinenzustände oder Fehlerzustände gleichermaßen verwendet werden. Will man die Zeile der Historienliste über die Spalte Value zuordnen, kann es vorkommen, dass eine Zuordnung zu einem Maschinenstatus und den fünf Fehlerzustandskategorien möglich ist. Die Zuordnung ist somit nicht eindeutig definiert:

**Tabelle: Historie**

ID	dt_databaseentry	dt_data	EntryID	flags	MachineID	ValueID	Value	ClientIP
96944	31.07.2017 09:14	31.07.2017 09:13:22	0	1	103	200	0	91.141.1.138

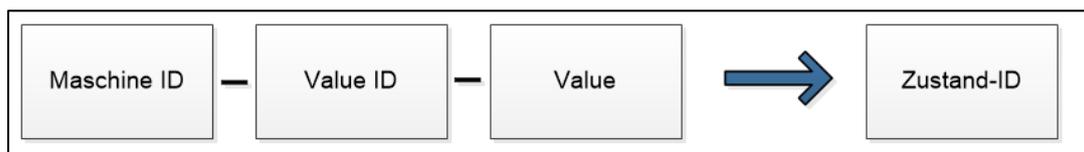
↓

**Mögliche Zustände bei der Zuordnung über die Value:**

ID	MachineID	valueID	Value	Beschreibung
25	103	200	0	Maschine aktiviert
44	103	210	0	Kein Fehler bei M1 aktiv!
62	103	211	0	Kein Fehler bei M2 aktiv!
80	103	212	0	Kein Fehler bei M3 aktiv!
98	103	213	0	Kein Fehler bei M4 aktiv!
116	103	214	0	Kein Fehler bei M5 aktiv

**Abbildung 34: Überprüfung der Eignung der Spalte Value als Primärschlüssel**

Die Spalten Machine ID, Value ID und Value werden in weiterer Folge zum Primärschlüssel Zustand-ID zusammengefasst, um eine eindeutige Identifizierung der Maschinen- und Fehlerzustände gewährleisten zu können (z.B. 103-200-16):



**Abbildung 35: Einführung der Zustand-ID zur eindeutigen Identifizierung**

Für die Value ID 103 wird keine Zustand-ID gebildet. Sie steht für die Stückzahlaufzeichnung und beinhaltet in der Spalte Value die absolute Stückzahl. Die Zustand-ID ist in diesem Fall nicht von Mehrwert.

### 3.1.5 Fehlerzustandskategorien

Die Fehlerzustände sind den fünf verschiedenen Kategorien mit den Zustand-IDs 103-210-X (Kategorie M1) bis 103-214-X (Kategorie M5) zugeordnet. Ein Fehlerzustand der jeweiligen Kategorie gilt bei Aufscheinen der zugehörigen Value 0 als behoben (beispielsweise wird der Fehler mit Zustand-ID 103-211-32 mit der Meldung 103-211-0 wieder quittiert)

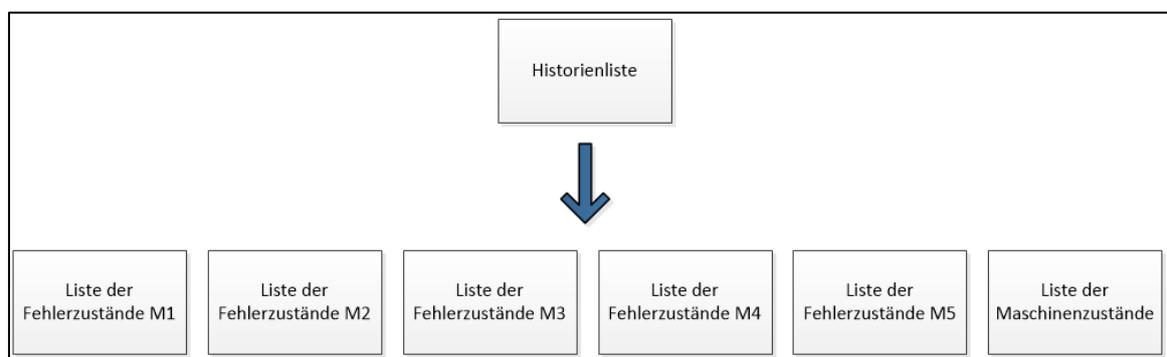
Es kann bei Vorhandensein eines Fehlers einer bestimmten Kategorie gleichzeitig ein Fehler einer anderen Kategorie auftreten. Dazu folgt ein kurzes *Beispiel*:

Ein Fehler mit Zustand-ID 103-210-2057 ist noch aktiv während eine weitere Fehlermeldung mit Zustand-ID 103-213-512 erscheint. Erst im Anschluss wird der Fehler 103-210-2057 durch die Meldung 103-210-0 als behoben erklärt. (siehe Tabelle 5)

Um in weiterer Folge die Dauer eines aufgetretenen Fehlerzustandes ermitteln zu können, müssen die Fehler in ihren fünf Kategorien M1 bis M5 separiert und unterschieden werden, da zwischen Fehlerauftritts- und Fehlerbehebungsmeldung ein Fehler einer anderen Kategorie auftreten kann.

### 3.1.6 Aufspaltung der Historienliste

Die Historie (ein Auszug dieser ist in Tabelle 5 dargestellt) beinhaltet die Maschinen- und Fehlerzustände des Produktionsprozesses in ihrem zeitlichen Auftreten, welche durch die Zustand-ID eindeutig definiert sind. Um die Dauer dieser Zustände ermitteln zu können, wird für die fünf Kategorien der auftretenden Fehlerzustände (M1–M5) und für die auftretenden Maschinenzustände jeweils eine eigene Historienliste gebildet:



**Abbildung 36: Aufspaltung der Historienliste**

Die Historienliste für die Maschinenzustände wird „Liste der Maschinenzustände“ genannt. Die einzelnen Historienlisten der Fehlerzustände werden als „Liste der Fehlerzustände M1 – M5“ bezeichnet.

## 3.2 Datenanalyse

Für die weitere Vorgehensweise ist eine Analyse der Daten erforderlich.

### 3.2.1 Analyse der Maschinenzustände

Beim Prozess können folgende Maschinenzustände auftreten:

- Maschine aktiviert
- Maschine aus
- Rüstvorgang

Die Liste der Maschinenzustände führt das zeitliche Auftreten der Maschinenzustände aus der Historienliste an. Ein Maschinenstatus ist so lange aktiv, bis er von einem anderen Maschinenstatus ersetzt wird.

ID	dt_data	Zustand-ID	Client IP	Maschinenzustand	date	Dauer [min]
96943	31.07.2017 09:08:14	103-200-16	91.141.1.138	Rüstvorgang	31.07.2017	5,13333333
96944	31.07.2017 09:13:22	103-200-0	91.141.1.138	Maschine aktiviert	31.07.2017	180,766667
97327	31.07.2017 12:14:09	103-200-16	77.119.130.153	Rüstvorgang	31.07.2017	4,4
97328	31.07.2017 12:18:33	103-200-0	77.119.130.153	Maschine aktiviert	31.07.2017	0
97725	01.08.2017 06:59:06	103-200-1	178.165.128.131	Maschine aus	01.08.2017	0,98333333
97731	01.08.2017 07:00:05	103-200-0	178.165.128.131	Maschine aktiviert	01.08.2017	0,36666667
97734	01.08.2017 07:00:27	103-200-1	178.165.128.131	Maschine aus	01.08.2017	0,06666667
97738	01.08.2017 07:00:32	103-200-0	178.165.128.131	Maschine aktiviert	01.08.2017	0,06666667
97742	01.08.2017 07:00:36	103-200-1	178.165.128.131	Maschine aus	01.08.2017	6,3
97807	01.08.2017 07:06:45	103-200-0	178.165.128.131	Maschine aktiviert	01.08.2017	0,63333333
97816	01.08.2017 07:07:24	103-200-1	178.165.128.131	Maschine aus	01.08.2017	17,55

**Tabelle 13: Auszug aus der Liste der Maschinenzustände**

In weiterer Folge wird für jeden Maschinenzustand die Gesamtdauer, die Anzahl der Auftritte und die mittlere Dauer pro Auftritt ermittelt.

#### 3.2.1.1 Anzahl der Auftritte eines Maschinenzustandes

Die Anzahl der Auftritte eines betrachteten Maschinenzustandes wird durch einen Zählvorgang in der zugrundeliegenden Liste der Maschinenzustände ermittelt. Dafür wird die Zustand-ID einer jeden Zeile der Liste der Maschinenzustände überprüft und bei einer Übereinstimmung mit der Zustand-ID des zu betrachtenden Maschinenzustandes die Anzahl um eins erhöht.

**Tabelle: Liste der Maschinenzustände**

ID	dt_databaseentry	dt_data	Zustand ID	ClientIP	Maschinenzustand	date	Dauer [min]
2	96106	28.07.2017 07:32	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebt	28.07.2017	4,11666667
3	96107	28.07.2017 07:36	103-200-0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	28.07.2017	198,65
4	96462	28.07.2017 10:55	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebt	28.07.2017	2,18333333
5	96463	28.07.2017 10:57	103-200-0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	28.07.2017	0
6	96943	31.07.2017 09:09	103-200-16	91.141.1.138	Chargenstempel abgebt	31.07.2017	5,13333333

Abbildung 37: Anzahl der Auftritte eines Maschinenzustandes

### 3.2.1.2 Gesamtdauer eines Maschinenzustandes

Die Dauer eines auftretenden Maschinenzustandes (Zeile in der Liste der Maschinenzustände, siehe Tabelle 13) wird durch den Anfangszeitpunkt (Beginn des betrachteten Maschinenzustandes) und den Endzeitpunkt (Beginn des nachfolgenden Maschinenzustandes) ermittelt. Die Zeitpunkte für Anfangs- und Endwert können aus der Spalte dt\_data entnommen werden. Haben die beiden Zeitpunkte nicht den selben Tag als Grundlage, so wird die Dauer auf 0 gesetzt, da die tatsächliche Dauer des Maschinenzustandes nicht bekannt ist. Formell bedeutet dies:

**Abbildung 38: Berechnung der Dauer eines Maschinenzustandes**

ID	dt_databaseentry	dt_data	Zustand ID	ClientIP	Maschinenzustand	date	Dauer [min]
2	96106	28.07.2017 07:32	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebt	28.07.2017	=WENN(L2<>
3	96107	28.07.2017 07:36	103-200-0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	28.07.2017	198,733333
4	96462	28.07.2017 10:55	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebt	28.07.2017	2,18333333

Abbildung 38: Berechnung der Dauer eines Maschinenzustandes

Zur Berechnung der Dauer eines aufgetretenen Maschinenzustandes wird daher der Zeitpunkt des Auftretens des darauffolgenden Maschinenzustandes vom Zeitpunkt des Auftretens des betrachteten Maschinenzustandes abgezogen, wenn beide Zustände am selben Tag eintreten.

Die Gesamtdauer eines Maschinenzustandes errechnet sich aus der Summe der zuvor errechneten Zeitspannen des betrachteten Maschinenzustandes. Die Werte für die Gesamtdauer der Maschinenzustände befinden sich in Tabelle 14 in der Spalte Dauer.

Formel: `=SUMMEWENN('Liste der Maschinenzustände'!I:I;E2;'Liste der Maschinenzustände'!M:M)/60`

Bereich: I:I, Suchkriterium: E2, Zu summierende Werte: M:M

ID	MachineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Berechg./Instand	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]	
25	103	200	0	103-200-0	Maschine aktiviert		408	=SUMMEWENN(I:I;E2;M:M)/60	2,132066993	
26	103	200	1	103-200-1	Maschine aus		406	52,495	7,757758621	
27	103	200	16	103-200-16	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	C	W	19	0,675833333	2,137719298

Tabelle: Liste der Maschinenzustände

ID	dt_databaseentry	dt_data	Zustand ID	ClientIP	Maschinenzustand	date	Dauer [min]	
2	96106	28.07.2017 07:32	28.07.2017 07:31:22	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abget	28.07.2017	4,116666667
3	96107	28.07.2017 07:36	28.07.2017 07:35:29	103-200-0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	28.07.2017	198,65
4	96462	28.07.2017 10:55	28.07.2017 10:54:13	103-200-16	178.115.131.120	Chargenstempel abget	28.07.2017	2,183333333
5	96463	28.07.2017 10:57	28.07.2017 10:56:24	103-200-0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	28.07.2017	0
6	96943	31.07.2017 09:09	31.07.2017 09:08:14	103-200-16	91.141.1.138	Chargenstempel abget	31.07.2017	5,133333333

Abbildung 39: Berechnung der Gesamtdauer eines Maschinenzustandes

### 3.2.1.3 Mittlere Dauer pro Auftritt eines Maschinenzustandes

Um die mittlere Dauer pro Auftritt eines Maschinenzustandes zu erhalten, wird die Gesamtdauer durch die Anzahl der Auftritte des betrachteten Maschinenzustandes geteilt. Diese Kennzahl beschreibt daher den arithmetischen Mittelwert der Dauer für ein Auftreten des betrachteten Maschinenzustandes.

Formel: `=WENNFEHLER(J2/I2*60;0)`

Wert: J2, Wert falls Fehler: 0

ID	MachineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Berechg./Instand	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]	
25	103	200	0	103-200-0	Maschine aktiviert		408	14,49805556	=WENNFEHLER(J2/I2*60)	
26	103	200	1	103-200-1	Maschine aus		406	52,49416667	7,757758621	
27	103	200	16	103-200-16	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	C	W	19	0,676944444	2,137719298

Abbildung 40: Mittlere Dauer pro Auftritt eines Maschinenzustandes

### 3.2.1.4 Zusammenfassung der Maschinenzustände

Eine Zusammenfassung der einzelnen Maschinenzustände ist in der folgenden Tabelle zu sehen. Die Spaltenbezeichnungen bedeuten dabei:

- **Zustand-ID:** Die Zustand-ID wurde eingeführt, um eine eindeutige Bezeichnung für die einzelnen Zustände zu erhalten. Außerdem dient sie als Verknüpfung der einzelnen Exceltabellen (Primärschlüssel), die als Grundlage für die Berechnung der einzelnen Parameter dienen. Die ID setzt sich aus der MachineID, ValueID und Value zusammen.
- **Beschreibung:** Die Beschreibung fasst den Maschinenzustand in Worte.
- **OEE:** In der Spalte OEE wird angegeben, in welchen OEE-Parameter der jeweilige Maschinenzustand für die Berechnung einfließt.
- **W./I.:** In dieser Spalte wird angegeben, ob der Maschinenzustand eine Wartungs- (W) bzw. Instandhaltungsmaßnahme (I) hervorruft.
- **Menge:** Die Menge zählt die Anzahl der Auftritte des Maschinenzustandes im betrachteten Zeitraum.

- Dauer: Die Spalte Dauer summiert die Dauer der jeweiligen Maschinenzustände und ist somit gleichbedeutend mit der Gesamtdauer eines Maschinenzustandes für den betrachteten Zeitraum.
- Dauer pro Auftritt: Die Dauer pro Auftritt gibt die mittlere Zeitspanne pro Auftritt für den jeweiligen Maschinenzustand an.

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. / I.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-200-0	MASCHINE AKTIVIERT			408	14,5	2,13
103-200-1	MASCHINE AUS			406	52,5	7,76
103-200-16	RÜSTVORGANG	C	W	19	0,68	2,14

**Tabelle 14: Maschinenzustände des Produktionsprozesses**

### 3.2.2 Analyse der Fehlerzustände

Die Fehlerzustände sind den fünf verschiedenen Kategorien mit den Zustand-IDs 103-210-X bis 103-214-X zugeordnet. Die Listen der Fehlerzustände M1 – M5 führen das zeitliche Auftreten der Fehlerzustände aus der Historienliste an. Ein Fehlerzustand der jeweiligen Kategorie gilt bei Aufscheinen der zugehörigen Zustand-ID 103-21X-0 als behoben (beispielsweise wird der Fehler 103-211-32 mit der Meldung 103-211-0 wieder quittiert).

ID	dt_data	Zustand-ID	Maschinenfehler	date	Dauer [min]
97883	01.08.2017 07:13:13	103-211-128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF	01.08.2017	0,03333333
97884	01.08.2017 07:13:15	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,41666667
97885	01.08.2017 07:13:40	103-211-1024	MASCHINEN ENCODER NULLSTELLUNG DURCHFUEHREN -- MAN. ZYKLUS	01.08.2017	0,03333333
97886	01.08.2017 07:13:42	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,45
97890	01.08.2017 07:14:09	103-211-32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET	01.08.2017	0,05
97892	01.08.2017 07:14:12	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,06666667
97894	01.08.2017 07:14:16	103-211-4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	01.08.2017	0,03333333
97895	01.08.2017 07:14:18	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	1,1
97897	01.08.2017 07:15:24	103-211-128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF	01.08.2017	0,03333333
97898	01.08.2017 07:15:26	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,06666667

**Tabelle 15: Auszug aus einer Liste der Fehlerzustände M2**

In weiterer Folge wird für jeden Fehlerzustand die Gesamtdauer, die Anzahl der Auftritte und die Dauer pro Auftritt ermittelt. Dabei wird die Berechnung exemplarisch für die Fehlerzustände der Kategorie M2 erläutert.

#### 3.2.2.1 Anzahl der Auftritte eines Fehlerzustandes

Die Anzahl der Auftritte eines betrachteten Fehlerzustandes wird durch einen Zählvorgang in der zugrundeliegenden Liste der Fehlerzustände M2 ermittelt. Dafür wird die Zustand-ID einer jeden Zeile der Liste der Fehlerzustände M2 überprüft und bei einer Übereinstimmung mit der Zustand-ID des zu betrachtenden Fehlerzustandes die Anzahl um eins erhöht.

**Table: Liste der Fehlerzustände M2**

ID	MaschineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Berechg./Instand	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
58	103	211	4096	103-211-4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	E	I	406	0,254166667
59	103	211	8192	103-211-8192	ALARM PRODUKTSTAU AM EINLAUFSBAND	E	I	345	0,213333333
60	103	211	16384	103-211-16384	PRODUKT-UEBERGABE NICHT IN POSITION	E	I	0	0
61	103	211	32768	103-211-32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET	D	I	380	0,234166667
62	103	211	0	103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!			de M2!;I1;E41	57,95861111
63	103	211	*	103-211-*	Kein Bitwert zugeordnet	D	I	1	0,000555556

ID	dt_databaseentry	dt_data	Zustand ID	ClientIP	Maschinenfehler	date	Dauer in min	
24	97848	01.08.2017 07:11	01.08.2017 07:10:38	103-211-4096	178.165.128.131	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	01.08.2017	0,03333333
25	97849	01.08.2017 07:11	01.08.2017 07:10:40	103-211-0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,23333333
26	97850	01.08.2017 07:11	01.08.2017 07:10:54	103-211-32768	178.165.128.131	KARTON NICHT AUFGERICHTET	01.08.2017	0,03333333
27	97851	01.08.2017 07:11	01.08.2017 07:10:56	103-211-0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,18333333
28	97859	01.08.2017 07:12	01.08.2017 07:11:07	103-211-16	178.165.128.131	PRODUKT-UEBERGABE AUSGESCHALTET	01.08.2017	0,03333333
29	97861	01.08.2017 07:12	01.08.2017 07:11:09	103-211-0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	0,2
30	97863	01.08.2017 07:12	01.08.2017 07:11:21	103-211-1	178.165.128.131	BEDIENER SICHERHEITSALARM	01.08.2017	0,03333333

Abbildung 41: Anzahl der Auftritte eines Fehlerzustandes

### 3.2.2.2 Gesamtdauer eines Fehlerzustandes

Die Dauer eines auftretenden Fehlerzustandes (Zeile in der Liste der Fehlerzustände, siehe Tabelle 15) wird durch den Anfangszeitpunkt (Beginn des betrachteten Fehlerzustandes) und den Endzeitpunkt (Beginn des nachfolgenden Fehlerzustandes) ermittelt und in die Liste der Fehlerzustände M1-M5 eingetragen. Die Zeitpunkte für Anfangs- und Endwert können aus der Spalte dt\_data entnommen werden. Haben die beiden Zeitpunkte nicht den selben Tag als Grundlage, so wird die Dauer auf 0 gesetzt, weil die tatsächliche Dauer des Fehlerzustandes nicht bekannt ist. Formell bedeutet dies:

**Table: Liste der Fehlerzustände M2**

ID	dt_databaseentry	dt_data	Zustand ID	ClientIP	Maschinenfehler	date	Dauer in min	
2	97724	01.08.2017 06:59	01.08.2017 06:59:05	103-211-32	178.165.128.131	STOERUNG NACHGESCHALTET	01.08.2017	=WENN(L2<>
3	97726	01.08.2017 07:00	01.08.2017 06:59:07	103-211-0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M2 aktiv!	01.08.2017	1,68333333
4	97746	01.08.2017 07:01	01.08.2017 07:00:48	103-211-1024	178.165.128.131	MASCHINEN ENCODER NULL!	01.08.2017	0,05

Abbildung 42: Berechnung der Dauer eines Fehlerzustandes

Zur Berechnung der Dauer eines aufgetretenen Fehlerzustandes wird daher der Zeitpunkt des Auftretens des darauffolgenden Fehlerzustandes vom Zeitpunkt des Auftretens des betrachteten Fehlerzustandes abgezogen, wenn beide Zustände am selben Tag eintreten.

Die Gesamtdauer eines Fehlerzustandes errechnet sich aus der Summe der zuvor errechneten Zeitspannen des betrachteten Fehlerzustandes. Die Werte für die Gesamtdauer der Maschinenzustände befinden sich in Tabelle 16 bis Tabelle 20 in der Spalte Dauer.

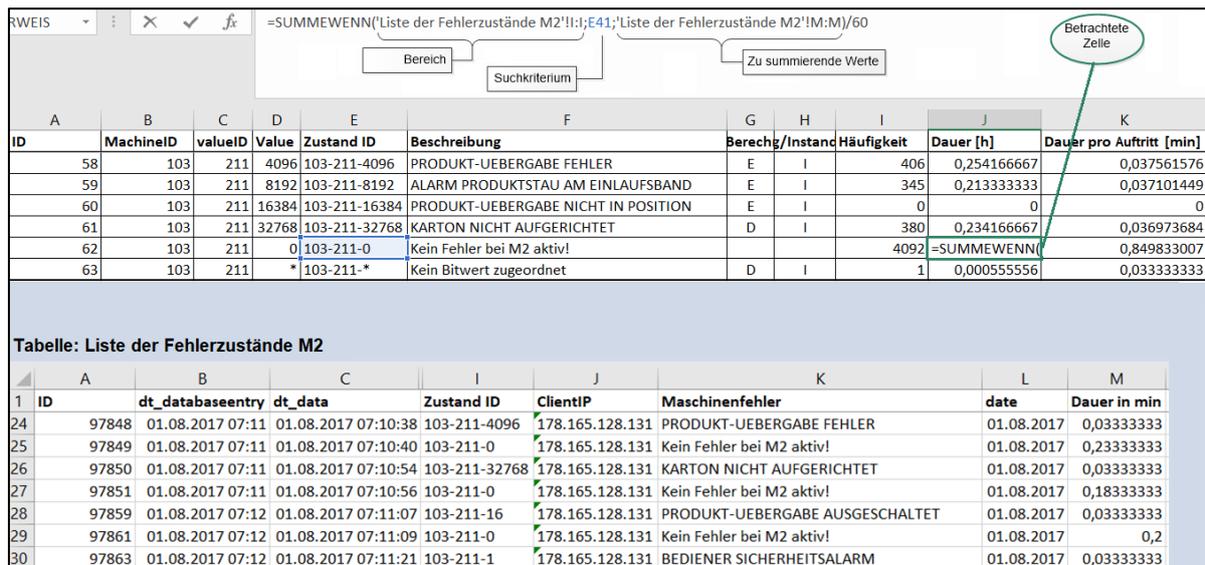


Abbildung 43: Berechnung der Gesamtdauer eines Fehlerzustandes

### 3.2.2.3 Mittlere Dauer pro Auftritt eines Fehlerzustandes

Um die mittlere Dauer pro Auftritt eines Fehlerzustandes zu erhalten, wird die Gesamtdauer durch die Anzahl der Auftritte des betrachteten Fehlerzustandes geteilt. Diese Kennzahl beschreibt daher den arithmetischen Mittelwert der Dauer für ein Auftreten des betrachteten Fehlerzustandes.



Abbildung 44: Mittlere Dauer pro Auftritt eines Fehlerzustandes

### 3.2.2.4 Zusammenfassung der Fehlerzustände

Eine Zusammenfassung der einzelnen Fehlerzustände erfolgt in den folgenden Tabellen. Die Spaltenbezeichnungen bedeuten dabei:

- **Zustand-ID:** Die Zustand-ID wurde eingeführt, um eine eindeutige Bezeichnung für die einzelnen Zustände zu erhalten. Außerdem dient sie als Verknüpfung der einzelnen Exceltabellen (Primärschlüssel), die als Grundlage für die Berechnung der einzelnen Parameter dienen. Die ID setzt sich aus der MachineID, ValueID und Value zusammen.
- **Beschreibung:** Die Beschreibung fasst den Fehlerzustand in Worte.
- **OEE:** In der Spalte OEE wird angegeben, in welchen OEE-Parameter der jeweilige Fehlerzustand für die Berechnung einfließt.

- W./I.: In dieser Spalte wird angegeben, ob der Fehlerzustand eine Wartungs- (W) bzw. Instandhaltungsmaßnahme (I) hervorruft.
- Menge: Die Menge zählt die Anzahl der Auftritte des Fehlerzustandes im betrachteten Zeitraum.
- Dauer: Die Spalte Dauer summiert die Dauer der jeweiligen Fehlerzustände und ist somit gleichbedeutend mit der Gesamtdauer eines Fehlerzustandes für den betrachteten Zeitraum.
- Dauer pro Auftritt: Die Dauer pro Auftritt gibt die mittlere Zeitspanne pro Auftritt für den jeweiligen Fehlerzustand an.

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. / I.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-210-1	NOT-AUS EIN	C	I	0	0	0
103-210-2	KEINE DRUCKLUFT	D	I	0	0	0
103-210-4	TÜRE OFFEN	D	I	189	3,84	1,22
103-210-8	MOTOR-SCHUTZ AUSGEOEST	D	I	0	0	0
103-210-16	UMRICHTER "HAUPTMOTOR" STOERUNG	D	I	0	0	0
103-210-32	FREQUENZREGLER UEBERLASTUNG	C	I	0	0	0
103-210-64	UEBERLAST PRODUKT-EINSCHUB	E	I	0	0	0
103-210-128	UEBERLAST BECHERKETTE	D	I	0	0	0
103-210-256	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	E	I	0	0	0
103-210-512	ZU VOLL AUSLAUFSTAU	E	I	0	0	0
103-210-1024	24V SPANNUNG FEHLT	D	I	0	0	0
103-210-2048	MIN. NIVEAUSTAND KARTONMAGAZIN	D	W	0	0	0
103-210-4096	KARTON MAGAZIN LEER	C	I	0	0	0
103-210-8192	FEHLER KARTONOEFFNER	D	I	0	0	0
103-210-16384	OBERE FUEHRUNG GEOFFNET	D	I	0	0	0
103-210-32768	UMRICHTER "UEBERGABE" STOERUNG	E	I	0	0	0
103-210-0	KEIN FEHLER BEI M1 AKTIV!			542	49,65	5,50
103-210-*	KEIN VALUE WERT ZUGEORDNET!	D	I	550	8,47	0,92

Tabelle 16: Analyse der Fehlerzustände M1 des Produktionsprozesses V2

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. / I.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-211-1	BEDIENER SICHERHEITSALARM	D	I	433	0,27	0,04
103-211-2	MASCHINE NICHT IN POSITION FÜR TIPPBE- TRIEB PRODUKTÜBERGABE	E	I	0	0	0
103-211-4	OBERE FUEHRUNG STOERUNG	D	I	0	0	0
103-211-8	TIME OUT ZYLINDER GERADERICHTER	D	I	0	0	0
103-211-16	PRODUKT-UEBERGABE AUSGESCHALTET	E	I	361	0,23	0,04
103-211-32	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	E	W	389	0,24	0,04
103-211-64	EINLAUFSTAU IN WARTESTELLUNG	E	I	390	0,24	0,04
103-211-128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF	E	I	392	0,24	0,04
103-211-256	PARAMETER-FEHLER FUER GESCHWINDIG- KEITSREDUZIERUNG	D	I	379	0,24	0,04
103-211-512	TIPPTASTER GESTECKT	D	I	0	0	0
103-211-1024	MASCHINEN ENCODER NULLSTELLUNG DURCHFUEHREN -- MAN. ZYKLUS	D	I	379	0,24	0,04
103-211-2048	TIME OUT ZYLINDER EINGABESCHACHT	D	I	406	0,25	0,04
103-211-4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	E	I	406	0,25	0,04
103-211-8192	ALARM PRODUKTSTAU AM EINLAUFSBAND	E	I	345	0,21	0,04
103-211-16384	PRODUKT-UEBERGABE NICHT IN POSITION	E	I	0	0	0
103-211-32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET	D	I	380	0,23	0,04
103-211-0	KEIN FEHLER BEI M2 AKTIV!			4092	57,96	0,85
103-211-*	KEIN VALUE WERT ZUGEORDNET!	D	I	1	0,001	0,03

Tabelle 17: Analyse der Fehlerzustände M2 des Produktionsprozesses V2

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. /I.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-212-1	SPS BATTERIE FEHLER!	D	I	371	0,23	0,04
103-212-2	KARTON-ABSAUGUNG OHNE PRODUKT EINGESCHALTET - TEST	C	I	407	0,26	0,04
103-212-4	KARTONANSAUGUNG EINSCHALTEN FUER AUTOMATIK BETRIEB	C	I	0	0	0
103-212-8	VAKUUM PUMPE FÜR PROSPEKT AUSGESCHALTET	D	I	0	0	0
103-212-16	TEST LEHRLAUF BETÄTIGT! - OPTIONAL	C	I	362	0,23	0,04
103-212-32	STAEBCHEN EINGABE AUSGESCHALTET JE NACH FORMAT			0	0	0
103-212-64	PROSPEKT ABSAUGUNG AUSGESCHALTET			375	0,23	0,04
103-212-128	PROSPEKT KONTROLLE AUSGESCHALTET			0	0	0
103-212-256	GERADERICHTER RUECKLAUF NICHT ZEITGERECHT ERFOLGT	D	I	363	0,23	0,04
103-212-512	KEIN PROSPEKT IN EINSCHUBSCHACHT	D	I	381	0,24	0,04
103-212-1024	FEHLER PROSPEKTABZUG	D	I	405	0,26	0,04
103-212-2048	PROSPEKT MAGAZIN LEER	C	I	361	0,23	0,04
103-212-4096	MIN. NIVEAUSTAND PROSPEKT MAGAZIN	D	W	415	0,26	0,04
103-212-8192	HOME AKSENSTELLE DOSIERER FOERDERUNG FEHT, START DRUECKEN	D	I	365	0,23	0,04
103-212-16384	NULL SCHNELLEINSTELLUNG FEHLER BEI STAEBCHEN FOERDERUNGSAKSE	D	I	0	0	0
103-212-32768	VON SEITE HOME/TIPPSCHALTER AKSE AUSTRETEN M ZU BEWEGEN	D	I	0	0	0
103-212-0	KEIN FEHLER BEI M3 AKTIV!			4040	57,76	0,86
103-212-*	KEIN VALUE WERT ZUGEORDNET!	D	I	406	0,25	0,04

Tabelle 18: Analyse der Fehlerzustände M3 des Produktionsprozesses V2

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. /I.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-213-1	FÜHLER SICHERHEIT OBERE FÜHRUNGSTÄBCHEN	D	I	0	0	0
103-213-2	ALL. 50(49)	D	I	0	0	0
103-213-4	FOERDERUNGSAKSE STEUERUNG NICHT STARTBEREIT	D	I	0	0	0
103-213-8	ALL. 52(51)	D	I	0	0	0
103-213-16	ALL. 53(52)	D	I	0	0	0
103-213-32	STEUERUNG KONTROLL KARTE NICHT BEREIT	D	I	0	0	0
103-213-64	WARTEZEIT ZU LANG HOME SEQUENZ STAEBCHEN TRANSPORTAKSE	D	I	0	0	0
103-213-128	ALL. 56(55)	D	I	0	0	0
103-213-256	ALL. 57(56)	D	I	0	0	0
103-213-512	ALL. 58(57)	D	I	1056	49,96	2,84
103-213-1024	NULLEINSTELLUNG LAUFEND, BITTE WARTEN...	D	I	0	0	0
103-213-2048	SCHACHT AUSSER LAGE	D	I	0	0	0
103-213-4096	WAHL TASTE ABDECKUNGSSICHERHEIT AUSGESCHLOSSEN	D	I	0	0	0
103-213-8192	AUSLAUFSTATION ABDECKUNGEN AUSGESCHALTET - OPTIONAL			0	0	0
103-213-16384	TIME OUT ZYLINDER STAEBCHEN AUSWURFKLAPPE	D	I	0	0	0
103-213-32768	PROSPEKT IM UEBERGABE BLOCKIERT	D	I	0	0	0
103-213-0	KEIN FEHLER BEI M4 AKTIV!			1054	11	0,63
103-213-*	KEIN VALUE WERT ZUGEORDNET!	D	I	0	0	0

Tabelle 19: Analyse der Fehlerzustände M4 des Produktionsprozesses V2

Zustand-ID	Beschreibung	OEE	W. / l.	Menge	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]
103-214-1	PRODUKT BEI AUSLAUFSCHIEBER BLOCKIERT	E	I	0	0	0
103-214-2	SIGNAL NACHGESCHALTETE MASCHINE AUS	E	I	434	0,27	0,04
103-214-4	TIME OUT ZYLINDER STAEBCHEN ENTNAHME	D	I	0	0	0
103-214-8	EINFUEHRUNGPROBELAUF STAEBCHEN EIN	C	I	379	0,24	0,04
103-214-16	STAEBCHEN ENTNAHME NICHT ZEITGERECHTER RÜCKLAUF	D	I	387	0,24	0,04
103-214-32	STAEBCHEN FEHLT AUF RIEMEN IN SCHACHTSTATION	D	I	0	0	0
103-214-64	HILFSTROMKREIS 90° SCHIEBER AM AUSLAUF FEHLT	D	I	0	0	0
103-214-128	STAEBCHEN MIN.FUELLSTAND IM TRICHTER	C	I	402	0,25	0,04
103-214-256	ALARM ETIKETTIERMASCHINE	D	I	0	0	0
103-214-512	ETIKETTE NICHT RICHTIG GEKLEBT	D	I	0	0	0
103-214-0	KEIN FEHLER BEI M5 AKTIV!			1599	58,36	2,19
103-214-*	KEIN VALUE WERT ZUGEORDNET!	D	I	0	0	0

Tabelle 20: Analyse der Fehlerzustände M5 des Produktionsprozesses V2

### 3.2.3 Analyse der produzierten Stückzahl

Während des Produktionsprozesses wird die absolute Anzahl an hergestellten Produkten in regelmäßigen zeitlichen Abständen aufgezeichnet und in der Historie mit der Value ID 103 abgespeichert.

ID	dt_data	Entry ID	flags	Machine ID	Value ID	Value	Client IP
97330	31.07.2017 12:22	0	1	103	103	10274774	77.119.130.153
97331	31.07.2017 12:23	0	1	103	103	10274829	77.119.130.153
97332	31.07.2017 12:24	0	1	103	103	10274885	77.119.130.153
97333	31.07.2017 12:25	0	1	103	103	10274941	77.119.130.153
97334	31.07.2017 12:26	0	1	103	103	10274998	77.119.130.153
97335	31.07.2017 12:27	0	1	103	103	10275053	77.119.130.153

Tabelle 21: Produzierte Stückzahl im Produktionsprozess V2

Um die produzierte Stückzahl einer gewissen Zeitperiode zu erhalten, muss der Value Wert des Anfangszeitpunktes vom Value Wert des Endzeitpunktes abgezogen werden.

### 3.3 Manuelles Modellieren des BN

Die manuelle Modellierung des BN erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die Knoten des Modells bestimmt und in die verschiedenen Ebenen des Modells eingeteilt. Anschließend werden die Verbindungen der Knoten über Pfeile, welche die kausalen Beziehungen der Knoten darstellen, erzeugt. Durch die Visualisierung der Abhängigkeiten der Knoten wird auch deutlich, welche Knoten nicht ausschlaggebend für die Aussagekraft des Modells sind. Diese scheiden in weiterer Folge aus. Um das Modell zu vervollständigen, werden die Wahrscheinlichkeitstabellen der einzelnen Knotenpunkte mit ihren bedingten Wahrscheinlichkeitswerten bestückt. Im Anschluss wird eine zeitliche Komponente eingeführt, um das BN dynamisch zu gestalten und so ein DBN zu modellieren.

#### 3.3.1 Aufstellen der BN-Struktur

Um das Modell generieren zu können, müssen zunächst die Knoten bestimmt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung eines BN für die zuverlässige Vorhersage einer vorausschauenden Instandhaltung mit der Hilfe von KPIs. Für das BN werden instandhaltungsrelevante KPIs der Managementebene (siehe Kapitel 2.2.3 bis 2.2.7) benötigt, welche die Instandhaltungseigenschaften des Produktionsprozesses beschreiben:

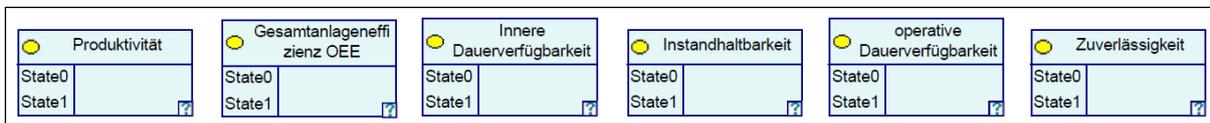


Abbildung 45: KPIs als Knoten des BN

Zur Erstellung des BN werden Daten des Produktionsprozesses aus der ausgewerteten Historie, welche der operativen Ebene entspringt, herangezogen. Diese Daten bestehen aus dem Maschinenstatus, dem Fehlerstatus und den Stückzahlen zur betrachteten Zeit. Die Fehlerzustände werden dabei in ihren fünf Kategorien separiert:

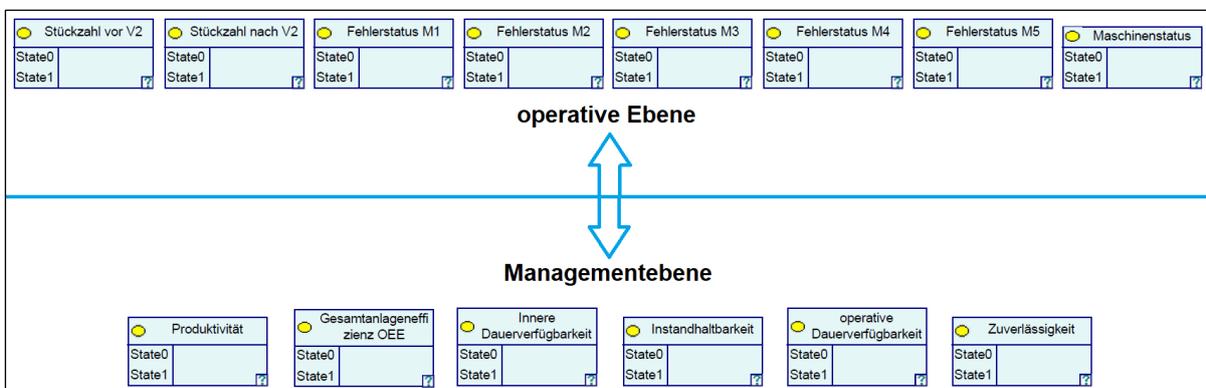


Abbildung 46: Knoten auf Basis der Daten des Produktionsprozesses

Es gilt eine Verbindung zwischen den Knoten auf Basis der Prozessdaten (operative Ebene) und den Knoten der KPIs (Managementebene) mit der Hilfe von Knoten auf einer Zwischenebene zu schaffen. Die gesuchten Knotenpunkte fungieren somit auch als Bindeglied zwischen der operativen Ebene und der Managementebene. Außerdem resultieren die gesuchten Knoten (Wirkung) aus den Knoten der Prozessdaten (Ursache), stellen aber gleichzeitig selbst eine Ursache für die Knoten der KPIs (Wirkung) dar.

Die Knoten der Zwischenebene ergeben sich aus den Formeln zur Berechnung der Leistungskennzahlen (siehe die Kapitel 2.2.2 bis 2.2.7):

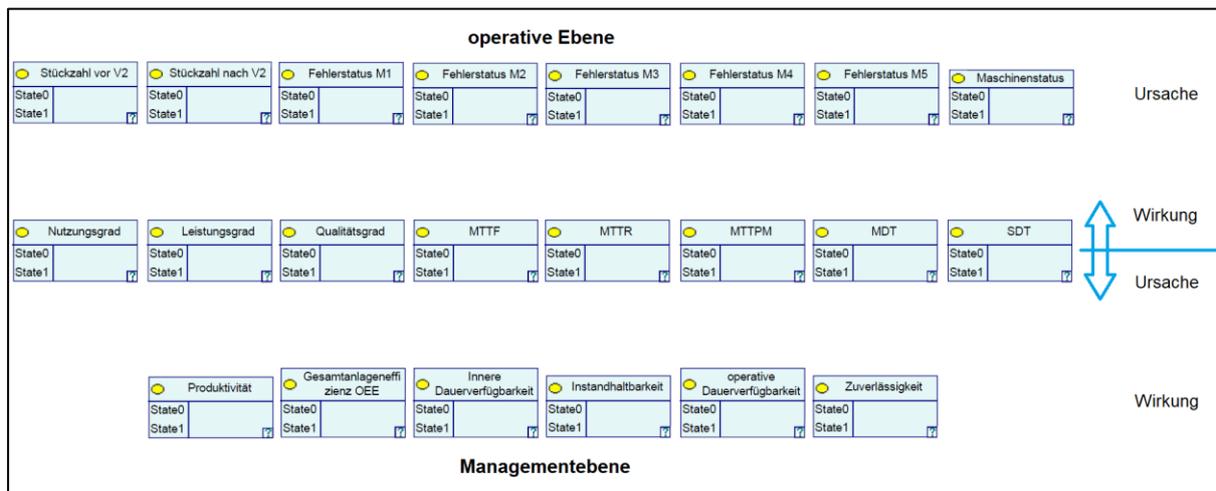


Abbildung 47: Knoten der Zwischenebene

Zur Herstellung von kausalen Beziehungen werden die voneinander abhängigen Knoten mit Pfeilen verbunden:

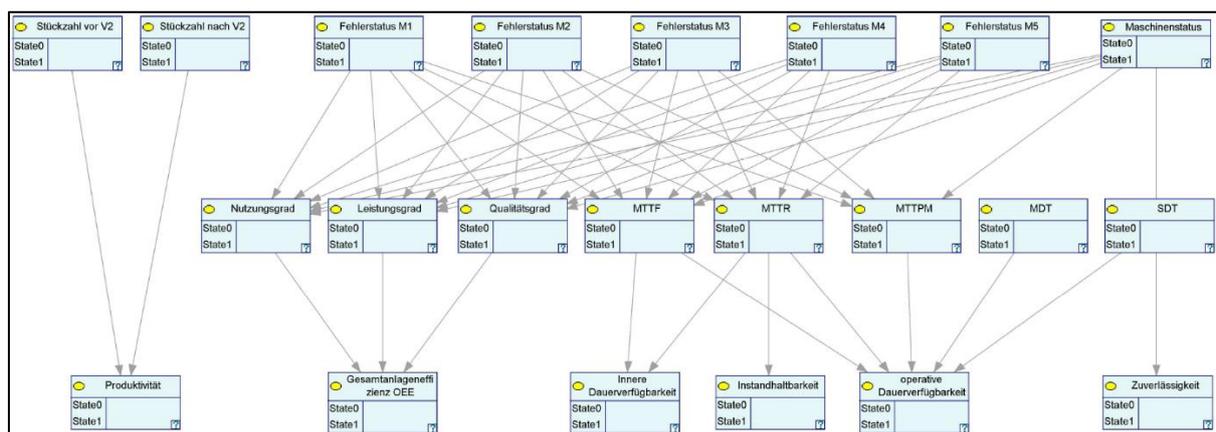


Abbildung 48: Herstellung der kausalen Beziehungen

Die Knoten aus denen der Pfeil entspringt (Schaft des Pfeiles), werden dabei als Elternknoten der Knoten, in denen der Pfeil mündet (Pfeilspitze), bezeichnet. Als *Beispiel* kann laut Abbildung 48 folgender Zusammenhang angegeben werden:

Der Knoten „Nutzungsgrad“ gilt als Elternknoten des Knotens „Gesamtanlageneffizienz OEE“.

Um eine gewisse Übersicht zu schaffen, werden die kausalen Beziehungen in Tabellen dargestellt:

Knoten (Wirkung)	Elternknoten (Ursache)				
Produktivität	Stückzahl vor V2	Stückzahl nach V2			
Gesamtanlageneffizienz OEE	Nutzungsgrad	Leistungsgrad	Qualitätsgrad		
Innere Dauerverfügbarkeit	MTTF	MTTR			
Instandhaltbarkeit	MTTR				
Operative Dauerverfügbarkeit	MTTF	MTTR	MTTPM	MDT	SDT
Zuverlässigkeit	Maschinenstatus				

**Tabelle 22: Kausale Beziehungen der Managementebene**

Knoten (Wirkung)	Elternknoten (Ursache)					
Nutzungsgrad	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Fehler M4	Fehler M5	Maschinenstatus
Leistungsgrad	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Fehler M4	Fehler M5	Maschinenstatus
Qualitätsgrad	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Fehler M4	Fehler M5	Maschinenstatus
MTTF	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Fehler M4	Fehler M5	Maschinenstatus
MTTR	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Fehler M4	Fehler M5	Maschinenstatus
MTTPM	Fehler M1	Fehler M2	Fehler M3	Maschinenstatus		
MDT						
SDT						

**Tabelle 23: Kausale Beziehungen der operativen Ebene**

### 3.3.2 Vereinfachung der BN-Struktur

Durch die Vereinfachung sinkt die Komplexität des erstellten Modells.

#### 3.3.2.1 Bedeutung der Knoten für das Modell

Die eingeführten kausalen Beziehungen verdeutlichen die Tatsache, dass manche eingeführte Knoten keine Bedeutung für die Vorhersage von Instandhaltungseigenschaften haben.

Die Produktivität und deren Elternknoten weisen keinerlei Verknüpfung zum übrigen Modell (im Speziellen zur Instandhaltbarkeit und der Dauerverfügbarkeit) auf. Somit werden die drei Knoten Stückzahl vor V2, Stückzahl nach V2 und Produktivität aus dem Modell ausgeschieden.

Die MDT und die SDT beschreiben die Instandhaltungswartezeit und die Logistikwartezeit. Diese fließen laut Berechnungsformel (siehe Kapitel 2.2.6.4) in die operative Dauerverfügbarkeit ein. In diesem speziellen Anwendungsfall sind die beiden Wartezeiten MDT und SDT bereits in der MTTR und der MTTPM berücksichtigt (siehe Abbildung 49), da sie in den zugrundeliegenden Daten vereint sind und nicht separiert werden können.

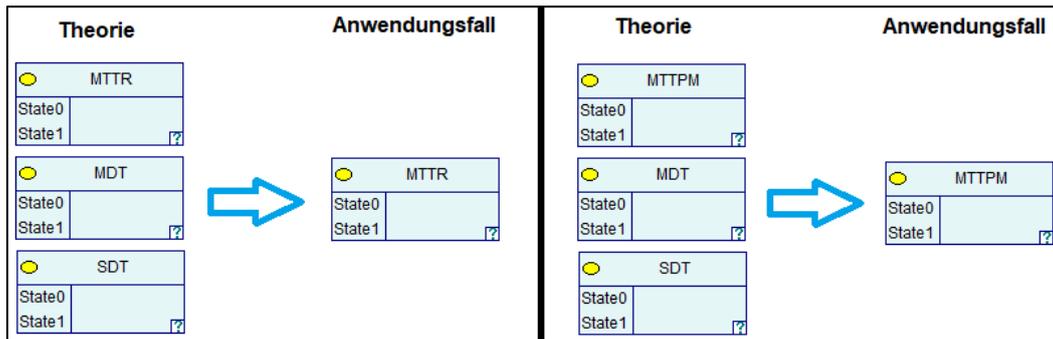


Abbildung 49: Berücksichtigung von MDT und SDT

Aus diesen beiden Tatsachen ergibt sich ein vereinfachtes Modell, das die Basis für das BN bildet:

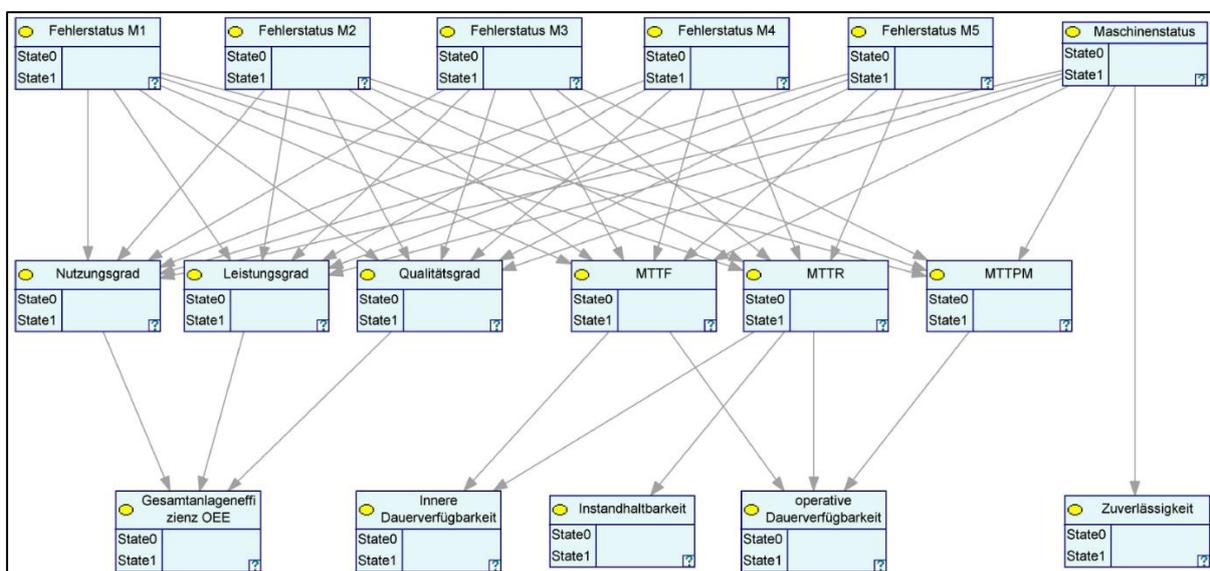


Abbildung 50: Vereinfachtes Modell als Grundlage für das BN

### 3.3.2.2 Die Kennzahlenarten als Modellebenen

Im BN werden instandhaltungsrelevante KPIs als Grundlage des Modells verwendet. Bei den übrigen Knoten des Modells handelt es sich ebenfalls um Kennzahlen, die den Kennzahlenarten aus Kapitel 2.2.1 zugeordnet werden können. Die Formation der einzelnen Knoten ist so gestaltet, dass die Knoten innerhalb einer Ebene (operative Ebene, Zwischenebene und Managementebene) bereits der Zuordnung zu den einzelnen Kennzahlenarten entsprechen:

- Bei den Knoten der operativen Ebene handelt es sich um KRIs.
- Die Knoten der Zwischenebene stellen RIs und PIs dar.
- Die Knoten der Managementebene sind KPIs.

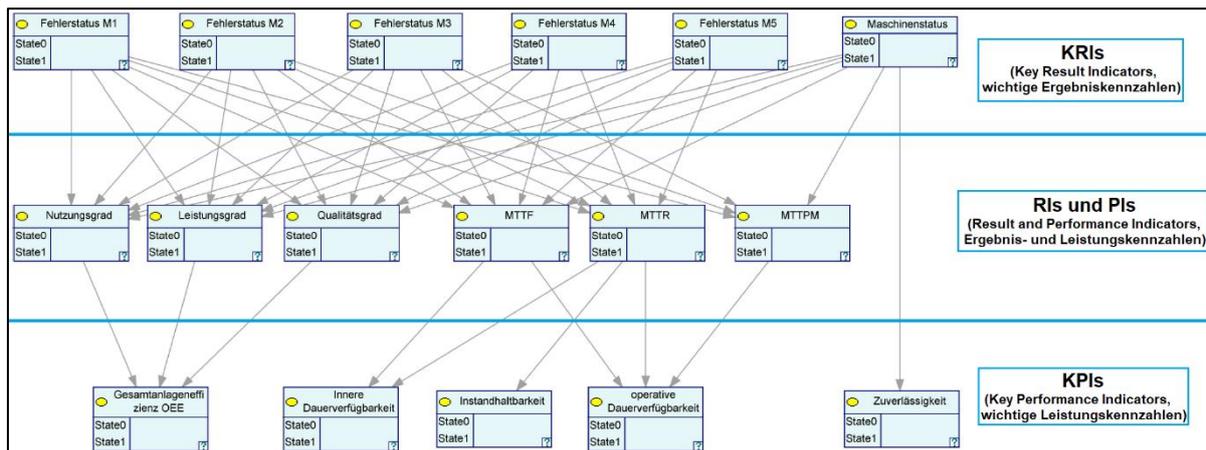


Abbildung 51: Die Kennzahlenarten als Modellebenen

In weiterer Folge werden die Ebenen nach den Kennzahlenarten benannt. Die Benennung der Ebenen lautet daher KRI-Ebene, RI/PI-Ebene und KPI-Ebene. Wird von den Knoten einer Ebene gesprochen, so wird die Benennung der Kennzahlenart herangezogen. Es wird z.B. für die Knoten der KPI-Ebene lediglich der Ausdruck KPIs verwendet.

### 3.3.3 Bestimmung der Zustände der einzelnen Knoten

Jeder Knoten kann zwei oder mehrere Zustände aufweisen. Zu diesem Zeitpunkt muss etwas vorgegriffen werden. In den folgenden Kapiteln werden die Zellen der CPT der einzelnen Knoten mit den zugehörigen Werten befüllt. Die Spaltenanzahl der CPT eines Knotens ist durch die Anzahl der Zustände der Elternknoten gegeben. Um den Arbeitsaufwand für die Befüllung der CPT noch vertreten zu können, sollte die Anzahl der Zustände eines Knotens auf ein vertretbares Minimum beschränkt werden.

Die Zustände der einzelnen Knoten werden in Tabelle 24 beschrieben.

Nutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad erhalten als Zustände unterteilte Prozentbereiche. Die Grenzen der Bereiche werden so gewählt, dass ein optimaler Kontrast für das Ergebnis entsteht. Daher werden die Grenzen der Bereiche für die einzelnen Knoten unterschiedlich gesetzt.

Die Zustände von MTTR, MTF und MTTPM werden in Zeitbereiche unterteilt. Die Grenzen der einzelnen Bereiche werden ebenfalls so gewählt, dass ein optimaler Kontrast für das Ergebnis entsteht. Die Grenzen der Bereiche werden daher unterschiedlich festgelegt.

Knoten	Zustände	Beschreibung
Fehlerstatus_M1 – M5	Fehler	Es tritt ein Fehler auf.
	Kein_Fehler	Es tritt kein Fehler auf.
Maschinenstatus	Maschine_aktiviert	
	Maschine_aus	
	Ruestvorgang	
- Nutzungsgrad - Leistungsgrad - Qualitätsgrad	P_0_98	0 bis 98 % Leistungsgrad
	P_98_99	98,001 bis 99 % Leistungsgrad
	P_99_99k5	99,001 bis 99,5 % Leistungsgrad
	P_99k5_100	99,501 bis 100 % Leistungsgrad
- MTTR - MTTF - MTTPM	min_0	0 Minuten MTTR
	min_0_0k5	0 bis 0,5 Minuten MTTR
	min_0k5_1k5	0,501 – 1,5 Minuten MTTR
	min_1k5	Mehr als 1,5 Minuten MTTR
- OEE - Innere und operative Dauer- verfügbarkeit - Instandhaltbarkeit - Zuverlässigkeit	P_0	0 %
	P_0_20	0,001 – 20 %
	P_20_40	20,001 – 40 %
	P_40_60	40,001 – 60 %
	P_60_80	60,001 – 80 %
	P_80_100	80,001 – 100 %

Tabelle 24: Zustände der Knoten des BN

Die Zustände der einzelnen Knoten finden ihre Berücksichtigung im Modell:

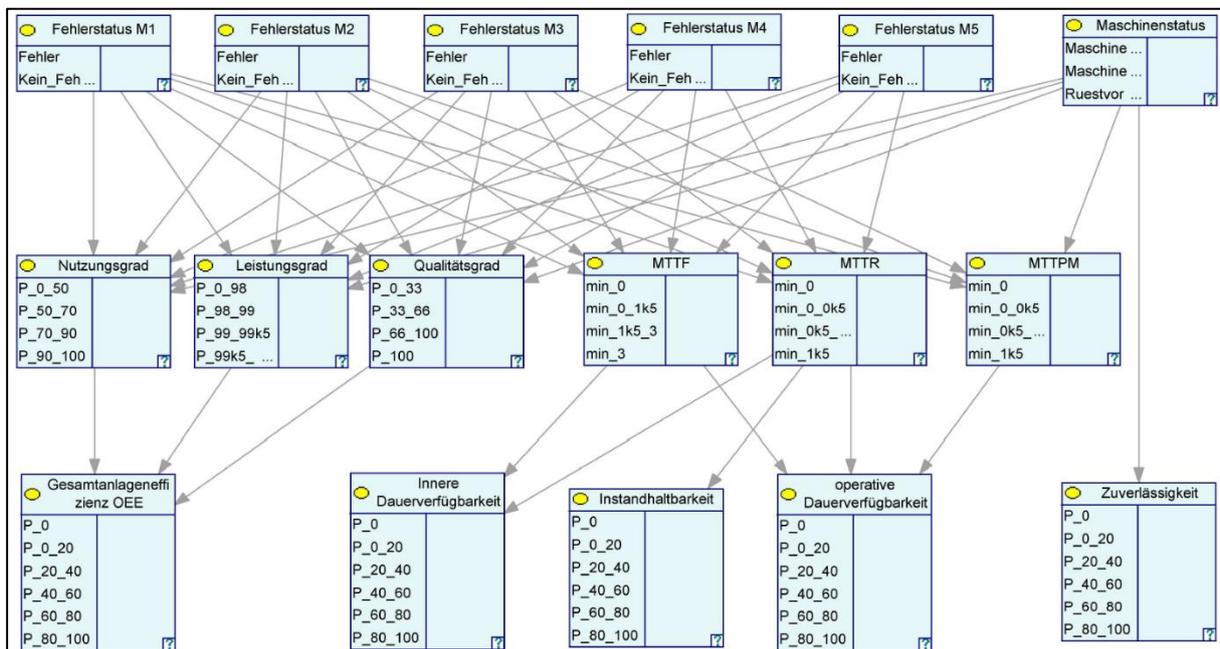


Abbildung 52: Die Knoten mit ihren einzelnen Zuständen

### 3.3.4 Die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle (CPT)

In diesem Kapitel wird die Charakteristik und die Befüllung einer CPT erläutert.

#### 3.3.4.1 Charakteristik einer CPT

Die Zustände des betrachteten Knotens stellen die Zeilen einer CPT dar.

Die Spalten einer CPT ergeben sich aus den möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten. Somit ergibt sich die Spaltenanzahl aus dem Produkt der Spaltenanzahlen der Elternknoten. Bei Knoten, die keine Elternknoten aufweisen, ist lediglich eine Spalte vorhanden.

$$\text{Spaltenanzahl des Knotens} = \prod \text{Zustände der Elternknoten}$$

Formel 30: Spaltenanzahl einer CPT

#### 3.3.4.2 Befüllung einer CPT

Es gilt die Zustände des betrachteten Knotenpunktes mit den Zustandskombinationen der Elternknoten in der CPT über bedingte Wahrscheinlichkeiten in Relation zu setzen. Dafür wird jede Zustandskombination der Elternknoten separat betrachtet, indem den Zuständen des betrachteten Knotenpunktes Wahrscheinlichkeiten für die betrachtete Zustandskombination zugewiesen wird. Wird eine Zustandskombination der Elternknoten betrachtet (d.h. die Spalte einer CPT), ergibt die Summe der Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände des betrachteten Knotenpunktes (d.h. die Spaltensumme einer CPT) stets den Wert 1.

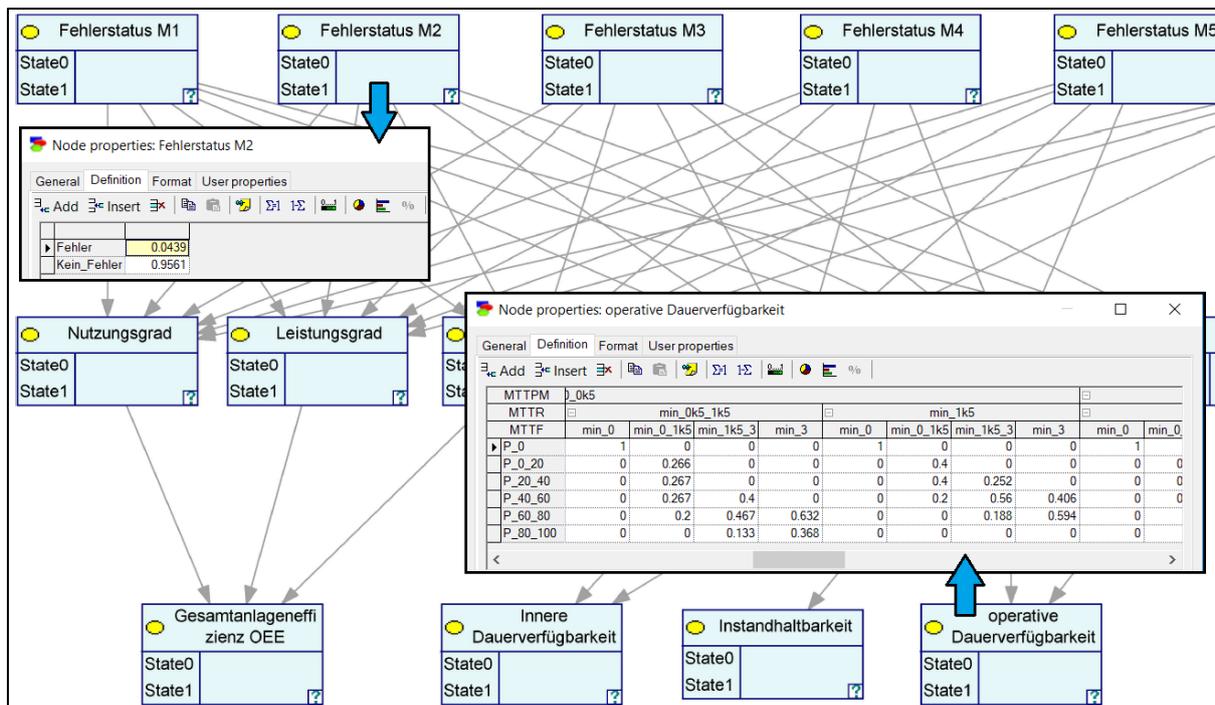


Abbildung 53: Die CPT einzelner Knoten des Modells

### 3.3.5 Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der KRIs

Zunächst gilt es die Wahrscheinlichkeitswerte für die Zustände der Fehlerstatusknoten und dem Maschinenstatusknoten zu ermitteln. Dazu werden in diesem Kapitel Maschinenstatus und Fehlerstatus getrennt betrachtet.

#### 3.3.5.1 Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte der Maschinenstatusknoten

Die Zustände des Maschinenstatus sind „Maschine aktiviert“ (103-200-0), „Maschine aus“ (103-200-1) und „Rüstvorgang“ (103-200-16).

In der CPT des Maschinenstatusknoten werden die Wahrscheinlichkeitswerte der einzelnen Maschinenzustände eingetragen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Maschinenzustand vorhanden ist, wird durch die relative Gesamtdauer dieses Zustandes ausgedrückt. Diese erhält man, wenn die Gesamtdauer des betrachteten Maschinenzustandes mit der Summe der Gesamtdauer aller Zustände ins Verhältnis gesetzt wird. Die Ermittlung der Gesamtdauer der einzelnen Maschinenzustände (Spalte Dauer) kann in Kapitel 3.2.1.2 nachgeschlagen werden.

Zustand-ID	Beschreibung	Dauer [h]	Berechnung der relativen Gesamtdauer	Wahrscheinlichkeitswert
103-200-0	MASCHINE AKTIVIERT	14,49	$\frac{14,49}{14,49 + 52,5 + 0,68} = 0,2142$	21,42 %
103-200-1	MASCHINE AUS	52,5	$\frac{52,5}{14,49 + 52,5 + 0,68} = 0,7758$	77,58 %
103-200-16	RÜSTVORGANG	0,68	$\frac{0,68}{14,49 + 52,5 + 0,68} = 0,0100$	1,00 %

**Tabelle 25: Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte des Maschinenzustandes**

#### 3.3.5.2 Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte der Fehlerstatusknoten

Jede Fehlerstatuskategorie (M1 – M5) bekommt einen eigenen Fehlerstatusknoten. Die möglichen Zustände der Fehlerstatusknoten werden auf zwei reduziert („Fehler“ oder „kein Fehler“), da man bei Berücksichtigung aller Fehlerzustände die CPT der nachfolgenden Knoten auf eine Größe bringt, die den Arbeitsaufwand nicht mehr rechtfertigen würde. Um den enormen Aufwand zu verdeutlichen, wird exemplarisch die Spaltenanzahl der CPT des Knotens „Nutzungsgrad“ für zwei Varianten berechnet. Die erste Variante beinhaltet alle möglichen Fehlerzustände für die einzelnen Fehlerstatusknoten. Die zweite Variante beschränkt die Anzahl der Zustände der einzelnen Fehlerstatusknoten auf zwei. Um die Spaltenanzahl der CPT zu erhalten, wird die Anzahl der möglichen Zustände der einzelnen Elternknoten miteinander multipliziert:

Berücksichtigung aller möglichen Fehlerzustände		Reduzierung auf zwei Fehlerzustände	
Elternknoten	Anzahl der Zustände	Elternknoten	Anzahl der Zustände
Fehlerstatus M1	18	Fehlerstatus M1	2
Fehlerstatus M2	18	Fehlerstatus M2	2
Fehlerstatus M3	18	Fehlerstatus M3	2
Fehlerstatus M4	18	Fehlerstatus M4	2
Fehlerstatus M5	12	Fehlerstatus M5	2
Maschinenstatus	3	Maschinenstatus	3
<b>Spaltenanzahl der CPT</b>	<b>3779136</b>	<b>Spaltenanzahl der CPT</b>	<b>96</b>

**Abbildung 54: Variantenvergleich zur Aufwandserklärung**

Der Zustand „kein Fehler“ der Fehlerstatusknoten entspricht dem Zustand „kein Fehler bei M\_ aktiv!“ aus dem Kapitel 3.2.1.4.. Die restlichen Zustände der jeweiligen Fehlerzustandskategorien werden im Zustand „Fehler“ des Fehlerknotens vereint (siehe Abbildung 55).

Die Zustände „Fehler“ und „kein Fehler“ sind gegensätzlich und ein Zustand schließt den jeweils anderen aus. Dadurch wird ein sogenanntes „Schwarz-Weiß-Denken“ im Modell implementiert. Um dieses Denken zu durchbrechen, wäre eine Zwischenstufe (z.B. „möglicher Fehler“) sinnvoll, die sich allerdings durch die zugrundeliegenden Daten nicht realisieren lässt.

Die Fehlerstatusknoten sind in ihren definierten Zuständen „Fehler“ und „kein Fehler“ (deren Wahrscheinlichkeitswerte für jeden Fehlerstatusknoten unterschiedlich ausfallen) gleich. In weiterer Folge wird für die Beschreibung der Vorgehensweise daher vom Fehlerzustand und Fehlerstatusknoten gesprochen, ohne dabei die Typen M1 – M5 zu unterscheiden.

*Exemplarisch wird die Berechnung für den Fehlerstatusknoten M2 durchgeführt:*

Zustand ID	Beschreibung	
103-211-1	BEDIENER SICHERHEITSALARM	
103-211-2	MASCHINE NICHT IN POSITION FUER TIPPBETRIEB PRODUKT-UEBERGABE	
103-211-4	OBERE FUEHRUNG STOERUNG	
103-211-8	TIME OUT ZYLINDER GERADERICHTER	
103-211-16	PRODUKT-UEBERGABE AUSGESCHALTET	
103-211-32	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	
103-211-64	EINLAUFSTAU IN WARTESTELLUNG	
103-211-128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF	
103-211-256	PARAMETER-FEHLER FUER GESCHWINDIGKEITSREDUZIERUNG	
103-211-512	TIPPTASTER GESTECKT	
103-211-1024	MASCHINEN ENCODER NULLSTELLUNG DURCHFUEHREN -- MAN. ZYKLUS	
103-211-2048	TIME OUT ZYLINDER EINGABESCHACHT	
103-211-4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	
103-211-8192	ALARM PRODUKTSTAU AM EINLAUFSBAND	
103-211-16384	PRODUKT-UEBERGABE NICHT IN POSITION	
103-211-32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET	
103-211-0	Kein Fehler bei M2 aktiv!	→ "Kein Fehler"
103-211-*	Kein Bitwert zugeordnet	

**Abbildung 55: Zuweisung der Fehlerzustände M2**

Die Gesamtdauer des Zustandes „Fehler“ setzt sich aus den Gesamtdauern der einzelnen Fehlerzustände (ausgenommen dem Fehler „kein Fehler bei M\_ aktiv!“) zusammen. Die Ermittlung der Gesamtdauer der einzelnen Fehlerzustände (Spalte Dauer) kann in Kapitel 3.2.2.2 nachgeschlagen werden. Sie werden in der folgenden Tabelle angeführt und zu der Gesamtdauer des Zustandes „Fehler“ summiert:

Zustand-ID	Beschreibung	Dauer [h]
103-211-1	BEDIENER SICHERHEITSALARM	0,2736
103-211-2	MASCHINE NICHT IN POSITION FUER TIPPBETRIEB PRODUKT-UEBERGABE	0
103-211-4	OBERE FUEHRUNG STOERUNG	0
103-211-8	TIME OUT ZYLINDER GERADERICHTER	0
103-211-16	PRODUKT-UEBERGABE AUSGESCHALTET	0,2267
103-211-32	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	0,2436
103-211-64	EINLAUFSTAU IN WARTESTELLUNG	0,2439
103-211-128	TIME OUT ZYLINDER PRODUKTSCHIEBER AM AUSLAUF	0,2444
103-211-256	PARAMETER-FEHLER FUER GESCHWINDIGKEITSREDUZIERUNG	0,2375
103-211-512	TIPPTASTER GESTECKT	0
103-211-1024	MASCHINEN ENCODER NULLSTELLUNG DURCHFUEHREN -- MAN. ZYKLUS	0,2389
103-211-2048	TIME OUT ZYLINDER EINGABESCHACHT	0,2522
103-211-4096	PRODUKT-UEBERGABE FEHLER	0,2542
103-211-8192	ALARM PRODUKTSTAU AM EINLAUFSBAND	0,2133
103-211-16384	PRODUKT-UEBERGABE NICHT IN POSITION	0
103-211-32768	KARTON NICHT AUFGERICHTET	0,2342
103-211-*	Kein Bitwert zugeordnet	0,0006
<b>Gesamtdauer des Zustandes „Fehler“</b>		<b>2,6631</b>

**Tabelle 26: Zusammensetzung der Gesamtdauer des Zustandes "Fehler"**

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Fehlerzustand vorhanden ist, wird durch die relative Gesamtdauer dieses Zustandes ausgedrückt. Diese erhält man, wenn die Gesamtdauer des betrachteten Fehlerzustandes mit der Summe der Gesamtdauer aller Zustände gesetzt wird.

Zustand	Dauer [h]	Berechnung der relativen Gesamtdauer	Wahrscheinlichkeitswert
Fehler	2,6631	$\frac{2,6631}{2,6631 + 57,9586} = 0,0439$	4,39%
Kein Fehler	57,9586	$\frac{57,9586}{2,6631 + 57,9586} = 0,9561$	95,61 %

**Tabelle 27: Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte des Fehlerzustandes M2**

### 3.3.5.3 CPT der KRIs

Die gesammelten Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KRI-Ebene befinden sich in der nachfolgenden Tabelle:

Knoten	Zustand	Wahrscheinlichkeitswert
Fehlerstatus M1	Fehler	19,87 %
	Kein Fehler	80,13 %
Fehlerstatus M2	Fehler	4,39 %
	Kein Fehler	95,61 %
Fehlerstatus M3	Fehler	4,37 %
	Kein Fehler	95,63 %
Fehlerstatus M4	Fehler	81,96 %
	Kein Fehler	18,04 %
Fehlerstatus M5	Fehler	1,68 %
	Kein Fehler	98,32 %
Maschinenstatus M1	Maschine aktiviert	21,42 %
	Maschine aus	77,58 %
	Rüstvorgang	1,00 %

**Tabelle 28: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KRI-Ebene**

Nachdem die CPTs der KRI-Ebene befüllt sind, wird das Modell aktualisiert. Dadurch werden die Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände jedes Knotenpunktes über Balken visualisiert:

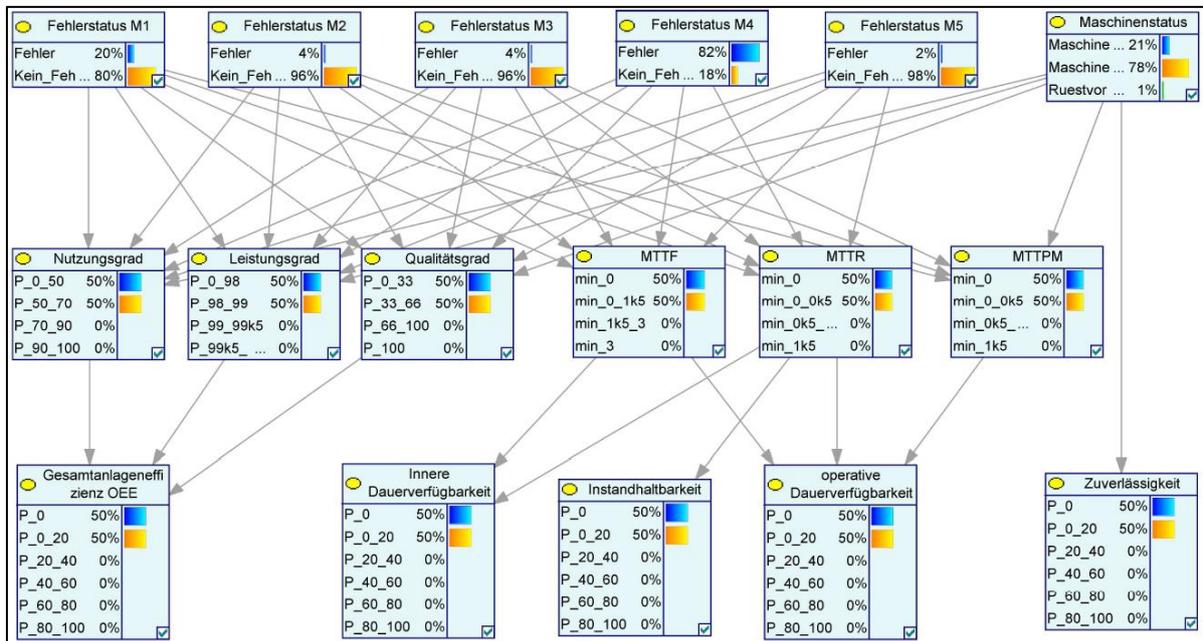


Abbildung 56: Visualisierte Zustände der KRI-Ebene

### 3.3.6 Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der RIs und PIs

Die Fehler- und Maschinenstatusknoten (KRI-Ebene) sind Elternknoten der RIs bzw. PIs und fließen direkt in die Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte der RIs und PIs ein. Die KRIs können somit als Ursache auf die Wirkung der Knoten aus der RI/PI-Ebene gesehen werden. Die kausalen Beziehungen der einzelnen Knoten sind in Tabelle 23 aufgelistet.

Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte in der RI/PI-Ebene werden Maschinen- bzw. Fehlerstatus nach deren Eigenschaften eingeteilt. Diese Eigenschaften werden in den Kapiteln 3.2.1.4 und 3.2.2.4 für jeden einzelnen Zustand aufgelistet. In der Spalte W./I. wird dabei zwischen einer relevanten Wartung oder Instandsetzung unterschieden. In der Spalte OEE ist jene Betriebsmittelzeit durch eine Abkürzung angegeben, für deren Berechnung der Maschinen- bzw. Fehlerzustand berücksichtigt werden muss.

Die Spalte W./I. und damit die Unterscheidung zwischen Wartung und Instandsetzung wird bei der Berechnung der MTTR und MTTPM berücksichtigt. Während ein Zustand, der für eine MTTR-Berechnung relevant sind, eine Instandsetzungsaktivität zur Folge hat, rufen die MTTPM-relevanten Zustände eine Wartungsaktivität hervor.

Die Spalte OEE ist für die Berechnung der Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgradwahrscheinlichkeiten von Bedeutung. Zur Berechnung dieser Wahrscheinlichkeiten

werden Betriebsmittelzustände benötigt. Diese weisen Buchstaben von B bis F auf, wobei B als Arbeitszeit definiert ist und als Ausgangspunkt dient. Um die Betriebsmittelzeit C zu erhalten, werden von der Arbeitszeit B die Gesamtdauer jener Maschinen- bzw. Fehlerzustände abgezogen, die in der Spalte OEE den Buchstaben C aufweisen. Dieser Vorgang wird bis zum Buchstaben F fortgeführt.

Die Tabellen zur Wahrscheinlichkeitsberechnung der Zustände sind in dieser Arbeit aus Darstellungsgründen transponiert abgebildet. Im zugrundeliegende Excelfile werden die Tabellen so abgebildet, dass die Ausrichtung der CPT dem Layout des Programmes GeNie SMILE entspricht.

### 3.3.6.1 MTTF

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes MTTF zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um fünf Elternknoten mit je zwei möglichen Zuständen. Die Spaltenanzahl errechnet sich somit wie folgt:

$$\text{Spaltenanzahl der MTTF-CPT} = 2 * 2 * 2 * 2 * 2 = 32$$

#### Formel 31: Berechnung der Spaltenanzahl der MTTF-CPT

Um die MTTF der einzelnen Zustandskombinationen berechnen zu können, wird der Mittelwert der ausfallfreien Zeit der Fehlerzustandskategorien (MTTF<sub>i</sub>) benötigt. Die MTTF<sub>i</sub> ist jeweils durch den Wert „Dauer pro Auftritt“ für den Fehlerzustand „Kein Fehler in M\_ aktiv!“ der zugrundeliegenden Fehlerzustandskategorie (siehe Tabelle 16 - Tabelle 20) gegeben.

Die Fehlerzustandskategorien M1 – M5 (in Tabelle 29 als F. M1 – M5 bezeichnet) können für Zustandskombinationen jeweils den Wert 1 oder 0 annehmen. Während der Wert 1 für den Zustand „Fehler“ steht, liegt dem Wert 0 der Zustand „kein Fehler“ zugrunde.

Der Wert für die MTTF beschreibt den Mittelwert aus den MTTF<sub>i</sub> der Fehlerzustandskategorien, die den Zustand „kein Fehler“ (in der Tabelle den Wert 0 in der Zustandskombination besitzen) aufweisen. Hat eine Fehlerzustandskategorie den Zustand „Fehler“, so ist diese zu diesem Zeitpunkt nicht relevant für einen zukünftigen Ausfall. Die Zustandskombination, die für jede Fehlerzustandskategorie den Wert 1 besitzt, ergibt für das Ergebnis 0 Minuten für die MTTF, da in jeder Fehlerzustandskategorie ein Fehler aufscheint und keine zusätzliche Fehlermeldung auftreten kann.

WENN  $=\text{WENN}(\text{ZÄHLENWENN}(E10:E14;SBS2)>0;\text{SUMMEWENN}(E10:E14;SBS2;SCS10:SCS14)/\text{ZÄHLENWENN}(E10:E14;SBS2);0)$

Bereich Suchkriterien Bereich Suchkriterien Summe Bereich  
Wahrheitstest Wert wenn wahr Wert wenn falsch

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Fehler	1		Zustände	u. Schranke o. Schranke										
2	Kein_Fehler	0		I	0	0									
3	Rüsvorgang	R		II	0,0001	1,5									
4	Instandsetzung	I		III	1,5001	3									
5	Wartung	W		IV	3,0001										
6															
7															
8															
9	Elternknoten	MTTF <sub>i</sub> [min]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	Fehlerstatus M3	0,8578		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	Fehlerstatus M2	0,8498		1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
12	Fehlerstatus M4	0,6262		1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
13	Fehlerstatus M5	2,1898		1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
14	Fehlerstatus M1	5,4963		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
15	MTTF [min]			0,000	SBS2;0	2,190	3,843	0,626	3,061	1,408	2,771	0,850	3,173	1,520	2,845

Betrachtete Zelle

Abbildung 57: Berechnung der MTTF der Zustandskombinationen

Die Berechnungsergebnisse der MTTF befinden sich in der mittleren Spalte der Tabelle 29.

Die Zeilenanzahl der CPT wird durch die Zustandsanzahl des Knotens MTTF vorgegeben. Bei den Zuständen des MTTF Knotenpunktes (mit den Ziffern I, II, III und IV in der transponierten CPT der Tabelle 29 abgekürzt) handelt es sich um Zeitintervalle.

Elternknoten	F. M3	F. M2	F. M4	F. M5	F. M1	MTTF [min]	Zustand des MTTF Knotenpunktes			
							I	II	III	IV
MTTF <sub>i</sub> [min]	0,8578	0,8498	0,6262	2,1898	5,4963	I	II	III	IV	
						0 min	0,0001 – 1,5 min	1,5001 – 3 min	>3min	
1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
2	1	1	1	1	0	5,496	0	0	0	1
3	1	1	1	0	1	2,190	0	0	1	0
4	1	1	1	0	0	3,843	0	0	0	1
5	1	1	0	1	1	0,626	0	1	0	0
6	1	1	0	1	0	3,061	0	0	0	1
7	1	1	0	0	1	1,408	0	1	0	0
8	1	1	0	0	0	2,771	0	0	1	0
9	1	0	1	1	1	0,850	0	1	0	0
10	1	0	1	1	0	3,173	0	0	0	1
11	1	0	1	0	1	1,520	0	0	1	0
12	1	0	1	0	0	2,845	0	0	1	0
13	1	0	0	1	1	0,738	0	1	0	0
14	1	0	0	1	0	2,324	0	0	1	0
15	1	0	0	0	1	1,222	0	1	0	0
16	1	0	0	0	0	2,291	0	0	1	0
17	0	1	1	1	1	0,858	0	1	0	0
18	0	1	1	1	0	3,177	0	0	0	1
19	0	1	1	0	1	1,524	0	0	1	0
20	0	1	1	0	0	2,848	0	0	1	0
21	0	1	0	1	1	0,742	0	1	0	0
22	0	1	0	1	0	2,327	0	0	1	0
23	0	1	0	0	1	1,225	0	1	0	0
24	0	1	0	0	0	2,293	0	0	1	0
25	0	0	1	1	1	0,854	0	1	0	0
26	0	0	1	1	0	2,401	0	0	1	0
27	0	0	1	0	1	1,299	0	1	0	0
28	0	0	1	0	0	2,348	0	0	1	0
29	0	0	0	1	1	0,778	0	1	0	0
30	0	0	0	1	0	1,958	0	0	1	0
31	0	0	0	0	1	1,131	0	1	0	0
32	0	0	0	0	0	2,004	0	0	1	0

Tabelle 29: Die MTTF Ergebnisse und die transponierte CPT

Die CPT wird befüllt, indem Wahrscheinlichkeitswerte für die Zustände des MTTF Knotenpunktes auf Basis der betrachteten Zustandskombination der Elternknoten eingetragen werden. Dafür werden die berechneten MTTF-Werte der Zustandskombinationen den Zeitintervallen (bzw. den Zuständen des MTTF Knotenpunktes) zugeordnet. Der Zustand des MTTF Knotenpunktes (das Zeitintervall), in den sich die MTTF einordnen, erhält den Wert 1. Die übrigen Zustände des MTTF Knotenpunktes bekommen für die betrachtete Zustandskombination den Wert 0 zugewiesen.

Die rechte Seite der Tabelle 29 enthält die transponierte CPT (farbig hinterlegte Zellen). Während die verschiedenen Zeilen die Zustandskombinationen darstellen, bezeichnen die Spalten die Zustände des MTTF Knotenpunktes.

Die berechneten Werte der CPT werden in die CPT des MTTF-Knotenpunktes eingetragen (siehe 3.3.4.2 Befüllung einer CPT). Das Programm GeNie SMILE berechnet mit Hilfe der Verteilungsfunktion des BN (Formel 28) automatisch die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des MTTF Knotenpunktes. Um diesen Vorgang nachvollziehen zu können, wird die im Programm hinterlegte Berechnung in weiterer Folge erläutert.

Für die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des MTTF Knotenpunktes (P[Zustand des MTTF Knotens]) wird die Wahrscheinlichkeit für den Auftritt der einzelnen Zustandskombinationen benötigt (P[Zustandskombination]). Die Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten für den jeweiligen Zustand „Fehler“ (P[1]) und „kein Fehler“ (P[0]) sind in Tabelle 28 gegeben. P[Zustandskombination] berechnet sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
22																		
23	Kategorie	P[Fehler] = P[1]	P[kein Fehler] = P[0]															Zust
24	F. M3	0.0437	0.9563	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	F. M2	0.0439	0.9561	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
26	F. M4	0.8196	0.1804	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
27	F. M5	0.0168	0.9832	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
28	F. M1	0.1987	0.8013	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
29	P[Zustandskombination]			=WENN(D24=	2.122E-05	0.0003071	0.0012387	1.158E-06	4.671E-06	6.76E-05	0.0002727	0.0001145	0.0004618	0.0066831	0.0269583	2.52E-05	0.0001017	0.0014713

Abbildung 58: Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustandskombinationen

Kategorie	F. M3	F. M2	F. M4	F. M5	F. M1	P[ Zustandskombination]
P[1]	0,0437	0,0439	0,8196	0,0168	0,1987	
P[0]	0,9563	0,9561	0,1804	0,9832	0,8013	
Zustandskombinationen	1	1	1	1	1	5E-06
	2	1	1	1	0	2E-05
	3	1	1	1	0	3E-04
	4	1	1	1	0	0,001
	5	1	1	0	1	1E-06
	6	1	1	0	1	5E-06
	7	1	1	0	0	7E-05
	8	1	1	0	0	3E-04
	9	1	0	1	1	1E-04
	10	1	0	1	1	5E-04
	11	1	0	1	0	0,007
	12	1	0	1	0	0,027
	13	1	0	0	1	3E-05
	14	1	0	0	1	1E-04
	15	1	0	0	0	0,001
	16	1	0	0	0	0,006
	17	0	1	1	1	1E-04
	18	0	1	1	1	5E-04
	19	0	1	1	0	0,007
	20	0	1	1	0	0,027
	21	0	1	0	1	3E-05
	22	0	1	0	1	1E-04
	23	0	1	0	0	0,001
	24	0	1	0	0	0,006
	25	0	0	1	1	0,003
	26	0	0	1	1	0,01
	27	0	0	1	0	0,146
	28	0	0	1	0	0,59
	29	0	0	0	1	6E-04
	30	0	0	0	1	0,002
	31	0	0	0	0	0,032
	32	0	0	0	0	0,13

Tabelle 30: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTF Knotenpunktes

Die Zellen der CPT des betrachteten Knotenpunktes MTTF werden mit den zugehörigen Werten der P[Zustandskombination] multipliziert. Dadurch erhält man die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes des MTTF-Knotenpunktes für eine betrachtete Zustandskombination (P[Zustand des MTTF | Zustandskombination]).

	P[Zustandskombination]	Zustand des MTTF Knotenpunktes				P[Zustand des MTTF   Zustandskombination]			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Zustandskombination	1	5E-06	1	0	0	5E-06	0	0	0
	2	2E-05	0	0	0	1	0	0	2E-05
	3	3E-04	0	0	1	0	0	3E-04	0
	4	0,001	0	0	0	1	0	0	0,001
	5	1E-06	0	1	0	0	0	1E-06	0
	6	5E-06	0	0	0	1	0	0	5E-06
	7	7E-05	0	1	0	0	0	7E-05	0
	8	3E-04	0	0	1	0	0	0	3E-04
	9	1E-04	0	1	0	0	0	1E-04	0
	10	5E-04	0	0	0	1	0	0	5E-04
	11	0,007	0	0	1	0	0	0	0,007
	12	0,027	0	0	1	0	0	0	0,027
	13	3E-05	0	1	0	0	0	3E-05	0
	14	1E-04	0	0	1	0	0	0	1E-04
	15	0,001	0	1	0	0	0	0,001	0
	16	0,006	0	0	1	0	0	0	0,006
	17	1E-04	0	1	0	0	0	1E-04	0
	18	5E-04	0	0	0	1	0	0	5E-04
	19	0,007	0	0	1	0	0	0	0,007
	20	0,027	0	0	1	0	0	0	0,027
	21	3E-05	0	1	0	0	0	3E-05	0
	22	1E-04	0	0	1	0	0	0	1E-04
	23	0,001	0	1	0	0	0	0,001	0
	24	0,006	0	0	1	0	0	0	0,006
	25	0,003	0	1	0	0	0	0,003	0
	26	0,01	0	0	1	0	0	0	0,01
	27	0,146	0	1	0	0	0	0,146	0
	28	0,59	0	0	1	0	0	0	0,59
	29	6E-04	0	1	0	0	0	6E-04	0
	30	0,002	0	0	1	0	0	0	0,002
	31	0,032	0	1	0	0	0	0,032	0
	32	0,13	0	0	1	0	0	0	0,13
<b>P[Zustand des MTTF-Knotens]</b>						<b>5E-06</b>	<b>0,1849</b>	<b>0,8129</b>	<b>0,0022</b>

Tabelle 31: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTF Knotenpunktes

Durch spaltenweise Addition der P[Zustand des MTTF | Zustandskombination] wird die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTF Knotenpunktes (P[Zustand des MTTF

Knotens]) berechnet. Diese finden sich als Balkendiagramm und Prozentzahlen im Knotenpunkt MTTF des BN (siehe Abbildung 64) wieder.

### 3.3.6.2 MTTR

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes MTTR zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um fünf Elternknoten mit je zwei möglichen Zuständen. Die Spaltenanzahl errechnet sich somit wie folgt:

$$\text{Spaltenanzahl der MTTR-CPT} = 2 * 2 * 2 * 2 * 2 = 32$$

**Formel 32: Berechnung der Spaltenanzahl der MTTR-CPT**

Um die MTTR der einzelnen Zustandskombinationen berechnen zu können, wird die mittlere Instandsetzungsdauer der Fehlerzustandskategorien (MTTR<sub>i</sub>) benötigt.

Für die MTTR<sub>i</sub> werden alle Fehlerzustände der betrachteten Fehlerzustandskategorie, die für die Instandsetzung relevant sind, berücksichtigt. Diese sind in der Spalte Wartung/Instandsetzung mit dem Buchstaben I für Instandsetzung gekennzeichnet. Um die MTTR<sub>i</sub> ermitteln zu können, wird für den Fehlerstatusknoten der Mittelwert aus den Werten „Dauer pro Auftritt“ der instandhaltungsrelevanten Fehlerzustände gebildet.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a CPT matrix for MTTR and a detailed table of error states. The CPT matrix is a 12x12 grid where the first column lists parent nodes (Elternknoten) and the first row lists child nodes (Zustände). The cells contain numerical values representing the probability of a child node being in a certain state given the parent nodes are in specific states. A green circle highlights a cell in the matrix, labeled 'Betrachtete Zelle'.

Below the CPT matrix is a table titled 'Tabelle: Beschreibung' with the following columns: ID, MachineID, valueID, Value, Zustand ID, Beschreibung, Berecht./Instand, Häufigkeit, Dauer [h], and Dauer pro Auftritt [min]. The table lists 18 error states with their corresponding IDs, machine values, and descriptions.

ID	MachineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Berecht./Instand	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]		
44	64	103	212	1	103-212-1	SPS BATTERIE FEHLER I	D	I	371	0,23	0,037196765
45	65	103	212	2	103-212-2	KARTON-ABSAUGUNG OHNE PRODUKT EINGESC	C	I	407	0,256388889	0,037796888
46	66	103	212	4	103-212-4	KARTONANSAUGUNG EINSCHALTEN FUER AUTO	C	I	0	0	0
47	67	103	212	8	103-212-8	VAKUUM PUMPE FUER PROSPEKT AUSGESCHAL	D	I	0	0	0
48	68	103	212	16	103-212-16	TEST LEHRLAUF BETAETIGT ! - OPTIONAL	C	I	362	0,227222222	0,037661142
49	69	103	212	32	103-212-32	STAEBCHEIN EINGABE AUSGESCHALTET JE NACH FORMAT			0	0	0
50	70	103	212	64	103-212-64	PROSPEKT ABSAUGUNG AUSGESCHALTET			375	0,231666667	0,037066667
51	71	103	212	128	103-212-128	PROSPEKT KONTROLLE AUSGESCHALTET			0	0	0
52	72	103	212	256	103-212-256	GERADERICHTER RUECKLAUF NICHT ZEITGERECH	D	I	363	0,226944444	0,037511478
53	73	103	212	512	103-212-512	KEIN PROSPEKT IN EINSCHUBSCHACHT	D	I	381	0,238611111	0,037576553
54	74	103	212	1024	103-212-1024	FEHLER PROSPEKTABZUG	D	I	405	0,256388889	0,037983539
55	75	103	212	2048	103-212-2048	PROSPEKT MAGAZIN LEER	C	I	361	0,226666667	0,03767313
56	76	103	212	4096	103-212-4096	MIN. NIVEAUSTAND PROSPEKT MAGAZIN	D	W	415	0,264722222	0,038273092
57	77	103	212	8192	103-212-8192	HOME AKSENSTELLE DOSIERER FOERDERUNG FE	D	I	365	0,229722222	0,037762557
58	78	103	212	16384	103-212-16384	NULL SCHNELLEINSTELLUNG FEHLER BEI STAEBC	D	I	0	0	0
59	79	103	212	32768	103-212-32768	VON SEITE HOME/TIPPSCHALTER AKSE AUSTRET	D	I	0	0	0
60	80	103	212	0	103-212-0	Kein Fehler bei M3 aktiv!			4040	57,76	0,857821782
61	81	103	212	*	103-212-*	Kein Bitwert zugeordnet	D	I	406	0,249166667	0,03682266

**Abbildung 59: Die mittlere Instandsetzungsdauer der Fehlerzustandskategorien**

Die Fehlerzustandskategorien M1 – M5 können bei den Zustandskombinationen jeweils den Wert 1 oder 0 annehmen. Während der Wert 1 für den Zustand „Fehler“ steht, liegt dem Wert 0 der Zustand „kein Fehler“ zugrunde.

Der Wert für die MTTR beschreibt den Mittelwert aus den  $MTTR_i$  der Fehlerzustandskategorien, die den Zustand „Fehler“ (in der Tabelle den Wert 1 in der Zustandskombination besitzen) aufweisen. Hat eine Fehlerzustandskategorie den Zustand „kein Fehler“, so ist diese zu diesem Zeitpunkt nicht relevant für die mittlere Instandsetzungsdauer. Die Zustandskombination, die für jede Fehlerzustandskategorie den Wert 0 besitzt, ergibt für das Ergebnis 0 Minuten für die MTTR, da in jeder Fehlerzustandskategorie kein Fehler aufscheint und dadurch keine Zeit für einen Instandsetzungsvorgang benötigt wird.

Die weiteren Berechnungsschritte sind identisch mit jenen der Berechnung des MTTF-Knotenpunktes (siehe Kapitel 3.3.6.1). Somit werden lediglich die Ergebnisse in tabellarischer Form präsentiert:

Elternknoten	F. M3	F. M2	F. M4	F. M5	F. M1	MTTR [min]	Zustand des MTTR Knotenpunktes				
							I	II	III	IV	
MTTR <sub>i</sub> [min]	0,0376	0,0371	2,8388	0,0374	1,0711		0 min	0,0001 – 0,5 min	0,5001 – 1,5 min	>1,5min	
Zustandskombination	1	1	1	1	1	1	0,804	0	0	1	0
	2	1	1	1	1	0	0,738	0	0	1	0
	3	1	1	1	0	1	0,996	0	0	1	0
	4	1	1	1	0	0	0,971	0	0	1	0
	5	1	1	0	1	1	0,296	0	1	0	0
	6	1	1	0	1	0	0,037	0	1	0	0
	7	1	1	0	0	1	0,382	0	1	0	0
	8	1	1	0	0	0	0,037	0	1	0	0
	9	1	0	1	1	1	0,996	0	0	1	0
	10	1	0	1	1	0	0,971	0	0	1	0
	11	1	0	1	0	1	1,316	0	0	1	0
	12	1	0	1	0	0	1,438	0	0	1	0
	13	1	0	0	1	1	0,382	0	1	0	0
	14	1	0	0	1	0	0,037	0	1	0	0
	15	1	0	0	0	1	0,554	0	0	1	0
	16	1	0	0	0	0	0,038	0	1	0	0
	17	0	1	1	1	1	0,996	0	0	1	0
	18	0	1	1	1	0	0,971	0	0	1	0
	19	0	1	1	0	1	1,316	0	0	1	0
	20	0	1	1	0	0	1,438	0	0	1	0
	21	0	1	0	1	1	0,382	0	1	0	0
	22	0	1	0	1	0	0,037	0	1	0	0
	23	0	1	0	0	1	0,554	0	0	1	0
	24	0	1	0	0	0	0,037	0	1	0	0
	25	0	0	1	1	1	1,316	0	0	1	0
	26	0	0	1	1	0	1,438	0	0	1	0
	27	0	0	1	0	1	1,955	0	0	0	1
	28	0	0	1	0	0	2,839	0	0	0	1
	29	0	0	0	1	1	0,554	0	0	1	0
	30	0	0	0	1	0	0,037	0	1	0	0
	31	0	0	0	0	1	1,071	0	0	1	0
	32	0	0	0	0	0	0,000	1	0	0	0

Tabelle 32: Die MTTR Ergebnisse und die transponierte CPT

Kategorie	F. M3	F. M2	F. M4	F. M5	F. M1	P[Zustandskombination]
P[1]	0,0437	0,0439	0,8196	0,0168	0,1987	
P[0]	0,9563	0,9561	0,1804	0,9832	0,8013	
Zustandskombination	1	1	1	1	1	5E-06
	2	1	1	1	1	2E-05
	3	1	1	1	0	0,0003
	4	1	1	1	0	0,0012
	5	1	1	0	1	1E-06
	6	1	1	0	1	5E-06
	7	1	1	0	0	7E-05
	8	1	1	0	0	0,0003
	9	1	0	1	1	0,0001
	10	1	0	1	1	0,0005
	11	1	0	1	0	0,0067
	12	1	0	1	0	0,027
	13	1	0	0	1	3E-05
	14	1	0	0	1	0,0001
	15	1	0	0	0	0,0015
	16	1	0	0	0	0,0059
	17	0	1	1	1	0,0001
	18	0	1	1	1	0,0005
	19	0	1	1	0	0,0067
	20	0	1	1	0	0,0271
	21	0	1	0	1	3E-05
	22	0	1	0	1	0,0001
	23	0	1	0	0	0,0015
	24	0	1	0	0	0,006
	25	0	0	1	1	0,0025
	26	0	0	1	1	0,0101
	27	0	0	1	0	0,1464
	28	0	0	1	0	0,5904
	29	0	0	0	1	0,0006
	30	0	0	0	1	0,0022
	31	0	0	0	0	0,0322
	32	0	0	0	0	0,13

Tabelle 33: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTR Knotenpunktes

	P[Zustandskombination]	Zustand des MTTR Knotenpunktes				P[Zustand des MTTR   Zustandskombination]			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Zustandskombination	1	5E-06	0	0	1	0	0	5E-06	0
	2	2E-05	0	0	1	0	0	2E-05	0
	3	0,0003	0	0	1	0	0	0,0003	0
	4	0,0012	0	0	1	0	0	0,0012	0
	5	1E-06	0	1	0	0	0	1,2E-06	0
	6	5E-06	0	1	0	0	0	4,7E-06	0
	7	7E-05	0	1	0	0	0	6,8E-05	0
	8	0,0003	0	1	0	0	0	0,00027	0
	9	0,0001	0	0	1	0	0	0	0,0001
	10	0,0005	0	0	1	0	0	0	0,0005
	11	0,0067	0	0	1	0	0	0	0,0067
	12	0,027	0	0	1	0	0	0	0,027
	13	3E-05	0	1	0	0	0	2,5E-05	0
	14	0,0001	0	1	0	0	0	0,0001	0
	15	0,0015	0	0	1	0	0	0	0,0015
	16	0,0059	0	1	0	0	0	0,00593	0
	17	0,0001	0	0	1	0	0	0	0,0001
	18	0,0005	0	0	1	0	0	0	0,0005
	19	0,0067	0	0	1	0	0	0	0,0067
	20	0,0271	0	0	1	0	0	0	0,0271
	21	3E-05	0	1	0	0	0	2,5E-05	0
	22	0,0001	0	1	0	0	0	0,0001	0
	23	0,0015	0	0	1	0	0	0	0,0015
	24	0,006	0	1	0	0	0	0,00597	0
	25	0,0025	0	0	1	0	0	0	0,0025
	26	0,0101	0	0	1	0	0	0	0,0101
	27	0,1464	0	0	0	1	0	0	0,1464
	28	0,5904	0	0	0	1	0	0	0,5904
	29	0,0006	0	0	1	0	0	0	0,0006
	30	0,0022	0	1	0	0	0	0,00223	0
	31	0,0322	0	0	1	0	0	0	0,0322
	32	0,13	1	0	0	0	0,13	0	0
<b>P[Zustand des MTTR-Knotens]</b>						<b>0,13</b>	<b>0,0147</b>	<b>0,1186</b>	<b>0,7367</b>

Tabelle 34: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTR Knotenpunktes

### 3.3.6.3 MTTPM

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes MTTPM zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um vier Elternknoten, wovon drei Elternknoten

zwei möglichen Zuständen besitzen, während ein Elternknoten drei mögliche Zustände besitzt. Die Spaltenanzahl errechnet sich somit wie folgt:

$$\text{Spaltenanzahl der MTTPM-CPT} = 2 * 2 * 3 * 2 = 24$$

**Formel 33: Berechnung der Spaltenanzahl der MTTPM-CPT**

Um die MTTPM der einzelnen Zustandskombinationen berechnen zu können, wird die mittlere Wartungsdauer der Fehlerzustandskategorien bzw. des Maschinenstatus (MTTPM<sub>i</sub>) benötigt.

Für die MTTPM<sub>i</sub> werden alle Fehlerzustände der betrachteten Fehlerstatusknoten, die für die Wartung relevant sind, und der Rüstvorgang beim Maschinenstatusknoten berücksichtigt. Diese sind in der Spalte *Wartung/Instandsetzung* mit dem Buchstaben *W* für *Wartung* gekennzeichnet. Der Rüstvorgang ist für das Modell in der *Wartung* berücksichtigt, weil in dieser Zeit *Wartungsarbeiten* getätigt werden.

Um die MTTPM<sub>i</sub> ermitteln zu können, wird für die einzelnen Fehlerstatusknoten der Mittelwert aus den Werten „Dauer pro Auftritt“ der wartungsrelevanten Fehlerzustände gebildet (siehe Abbildung 60). Die Fehlerstatusknoten *M4* und *M5* besitzen keine wartungsrelevanten Fehlerzustände und entfallen als Elternknoten. Die MTTPM<sub>i</sub> für den Maschinenstatus erhält ihren Wert aus der Spalte „Dauer pro Fehler“ für den Zustand *Rüstvorgang*.

Die Fehlerzustandskategorien *M1* – *M3* können bei den Zustandskombinationen jeweils den Wert 1 oder 0 annehmen. Während der Wert 1 bei den Fehlerstatusknoten für den Zustand „Fehler“ steht, liegt dem Wert 0 der Zustand „kein Fehler“ zugrunde. Beim Maschinenstatus steht der Wert 1 für den Maschinenzustand „Rüstvorgang“ und der Wert 0 für die Maschinenzustände „Maschine aktiviert“ und „Maschine aus“.

Der Wert für die MTTPM beschreibt den Mittelwert aus den MTTPM<sub>i</sub> der einzelnen Elternknoten, die den Wert 1 in der Tabelle (Zustand „Fehler“ bei den Fehlerstatusknoten bzw. Zustand „Rüstvorgang“ beim Maschinenstatusknoten) aufweisen. Hat ein Fehlerstatusknoten den Zustand „kein Fehler“ oder der Maschinenstatus den Zustand „Maschine aktiviert“ bzw. „Maschine aus“, so ist dieser zu diesem Zeitpunkt nicht relevant für die mittlere Instandsetzungsdauer. Die Zustandskombination, die für jeden Fehlerstatusknoten und für den Maschinenstatusknoten den Wert 0 besitzt, hat 0 Minuten als Ergebnis für die MTTPM, da in jeder Fehlerzustandskategorie kein Fehler aufscheint und dadurch keine Zeit für einen Instandsetzungsvorgang benötigt wird.

VERWEIS: =SUMMEWENN(Beschreibung!H44:H61;SB55;Beschreibung!K44:K61)/ZÄHLENWENNS(Beschreibung!H44:H61;SB55;Beschreibung!K44:K61;">0")

Bereich: Suchkriterien, Summe Bereich, Kriterienbereich 1, Kriterien 1, Kriterien 2, Kriterienbereich 2

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1 Fehler	1		Zustände	u. Schranke	o. Schranke										
2 Kein_Fehler	0				0										
3 Rüstvorgang	R		I		0,0001										
4 Instandsetzung	I		II		0,5001										
5 Wartung	W		III		1,5001										
			IV												
CPT des Knotens MTTPM															
Befrachtete Zelle															
Elternknoten		MTTPM, [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Fehlerstatus M3		K44:K61;">0")	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Fehlerstatus M2		0,03757	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Maschinenstatus		2,13772	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	
Fehlerstatus M1		0,00000	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
MTTPM [min]			0,025	0,038	0,025	0,038	0,553	0,738	0,019	0,038	0,019	0,038	0,725	1,088	
Zustand des MTTPM Knotenpunktes		I	0 min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		II	0,0001 – 0,5 min	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	
		III	0,5001 – 1,5 min	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
		IV	>1,5min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabelle: Beschreibung**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
ID	MachineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Berech./Instand	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]		
44	64	103	212	1	103-212-1	SPS BATTERIE FEHLER !	D	I	371	0,23	0,037196765
45	65	103	212	2	103-212-2	KARTON-ABSAUGUNG OHNE PRODUKT EINGESC	C	I	407	0,256388889	0,037796888
46	66	103	212	4	103-212-4	KARTONANSAUGUNG EINSCHALTEN FUER AUTOC	C	I	0	0	0
47	67	103	212	8	103-212-8	VAKUUM PUMPE FUER PROSPEKT AUSGESCHAL	D	I	0	0	0
48	68	103	212	16	103-212-16	TEST LEHRLAUF BETAETIGT I - OPTIONAL	C	I	362	0,227222222	0,037661142
49	69	103	212	32	103-212-32	STAEBCHEN EINGABE AUSGESCHALTET JE NACH			0	0	0
50	70	103	212	64	103-212-64	PROSPEKT ABSAUGUNG AUSGESCHALTET			375	0,231666667	0,037066667
51	71	103	212	128	103-212-128	PROSPEKT KONTROLLE AUSGESCHALTET			0	0	0
52	72	103	212	256	103-212-256	GERADERICHTER RUECKLAUF NICHT ZEITGEREC	D	I	363	0,226944444	0,037511478
53	73	103	212	512	103-212-512	KEIN PROSPEKT IN EINSCHUBSCHACHT	D	I	381	0,238611111	0,037576553
54	74	103	212	1024	103-212-1024	FEHLER PROSPEKTABZUG	D	I	405	0,256388889	0,037983539
55	75	103	212	2048	103-212-2048	PROSPEKT MAGAZIN LEER	C	I	361	0,226666667	0,03767313
56	76	103	212	4096	103-212-4096	MIN. NIVEAUSTAND PROSPEKT MAGAZIN	D	W	415	0,264722222	0,038273092
57	77	103	212	8192	103-212-8192	HOME AKSENSTELLE DOSIERER FOERDERUNG FE	D	I	365	0,229722222	0,037762557
58	78	103	212	16384	103-212-16384	NULL SCHNELLEINSTELLUNG FEHLER BEI STAEB	D	I	0	0	0
59	79	103	212	32768	103-212-32768	VON SEITE HOME/TIPPSCHALTER AKSE AUSTRET	D	I	0	0	0
60	80	103	212	0	103-212-0	Kein Fehler bei M3 aktiv!			4040	57,76	0,857821782
61	81	103	212	*	103-212-*	Kein Bitwert zugeordnet	D	I	406	0,249166667	0,03682266

Abbildung 60: Die mittlere Wartungsdauer der Fehlerzustandskategorien

Die weiteren Berechnungsschritte sind identisch mit jenen der Berechnung des MTTF-Knotenpunktes (siehe Kapitel 3.3.6.1). Somit werden lediglich die Ergebnisse in tabellarischer Form präsentiert:

Elternknoten	F. M3	F. M2	Masch.	F.M1	MTTPM [min]	Zustand des MTTPM Knotenpunktes				
						I	II	III	IV	
MTTPM, [min]	0,0383	0,0376	2,1377	0,0000		0 min	0,0001 – 0,5 min	0,5001 – 1,5 min	>1,5min	
Zustandskombination	1	1	1	0	1	0,025	0	1	0	0
	2	1	1	0	0	0,038	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0,025	0	1	0	0
	4	1	1	0	0	0,038	0	1	0	0
	5	1	1	1	1	0,553	0	0	1	0
	6	1	1	1	0	0,738	0	0	1	0
	7	1	0	0	1	0,019	0	1	0	0
	8	1	0	0	0	0,038	0	1	0	0
	9	1	0	0	1	0,019	0	1	0	0
	10	1	0	0	0	0,038	0	1	0	0
	11	1	0	1	1	0,725	0	0	1	0
	12	1	0	1	0	1,088	0	0	1	0
	13	0	1	0	1	0,019	0	1	0	0
	14	0	1	0	0	0,038	0	1	0	0
	15	0	1	0	1	0,019	0	1	0	0
	16	0	1	0	0	0,038	0	1	0	0
	17	0	1	1	1	0,725	0	0	1	0
	18	0	1	1	0	1,088	0	0	1	0
	19	0	0	0	1	0,000	1	0	0	0
	20	0	0	0	0	0,000	1	0	0	0
	21	0	0	0	1	0,000	1	0	0	0
	22	0	0	0	0	0,000	1	0	0	0
	23	0	0	1	1	1,069	0	0	1	0
	24	0	0	1	0	2,138	0	0	0	1

Tabelle 35: Die MTTPM Ergebnisse und die transponierte CPT

Kategorie	F. M3	F. M2	Masch.	F. M1	P[Zustandskombination]	
P[1]	0,0437	0,0439	0,0100	0,1987		
P[0]	0,9563	0,9561	0,4950	0,8013		
Zustandskombination	1	1	1	0	1	0,0002
	2	1	1	0	0	0,0008
	3	1	1	0	1	0,0002
	4	1	1	0	0	0,0008
	5	1	1	1	1	4E-06
	6	1	1	1	0	2E-05
	7	1	0	0	1	0,0041
	8	1	0	0	0	0,0166
	9	1	0	0	1	0,0041
	10	1	0	0	0	0,0166
	11	1	0	1	1	8E-05
	12	1	0	1	0	0,0003
	13	0	1	0	1	0,0041
	14	0	1	0	0	0,0167
	15	0	1	0	1	0,0041
	16	0	1	0	0	0,0167
	17	0	1	1	1	8E-05
	18	0	1	1	0	0,0003
	19	0	0	0	1	0,0899
	20	0	0	0	0	0,3627
	21	0	0	0	1	0,0899
	22	0	0	0	0	0,3627
	23	0	0	1	1	0,0018
	24	0	0	1	0	0,0073

Tabelle 36: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTPM Knotenpunktes

	P[Zustandskombination]	Zustand des MTTPM Knotenpunktes				P[Zustand des MTTPM   Zustandskombination]			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Zustandskombination	1	0,0002	0	1	0	0	0,00019	0	0
	2	0,0008	0	1	0	0	0,00076	0	0
	3	0,0002	0	1	0	0	0,00019	0	0
	4	0,0008	0	1	0	0	0,00076	0	0
	5	4E-06	0	0	1	0	0	0	3,8E-06
	6	2E-05	0	0	1	0	0	0	1,5E-05
	7	0,0041	0	1	0	0	0	0,00411	0
	8	0,0166	0	1	0	0	0	0,01656	0
	9	0,0041	0	1	0	0	0	0,00411	0
	10	0,0166	0	1	0	0	0	0,01656	0
	11	8E-05	0	0	1	0	0	0	8,3E-05
	12	0,0003	0	0	1	0	0	0	0,00034
	13	0,0041	0	1	0	0	0	0,00413	0
	14	0,0167	0	1	0	0	0	0,01666	0
	15	0,0041	0	1	0	0	0	0,00413	0
	16	0,0167	0	1	0	0	0	0,01666	0
	17	8E-05	0	0	1	0	0	0	8,4E-05
	18	0,0003	0	0	1	0	0	0	0,00034
	19	0,0899	1	0	0	0	0,08991	0	0
	20	0,3627	1	0	0	0	0,36268	0	0
	21	0,0899	1	0	0	0	0,08991	0	0
	22	0,3627	1	0	0	0	0,36268	0	0
	23	0,0018	0	0	1	0	0	0	0,00182
	24	0,0073	0	0	0	1	0	0	0,00733
<b>P[Zustand des MTTPM-Knotens]</b>						<b>0,9052</b>	<b>0,0848</b>	<b>0,0027</b>	<b>0,0073</b>

Tabelle 37: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTPM Knotenpunktes

### 3.3.6.4 Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad

Für die Berechnung des Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrades wird die Arbeitszeit des betrachteten Zeitraumes benötigt. Hierfür werden die Stückzahlaufzeichnungen (ValueID 103) herangezogen, da diese in periodischen Zeitabständen erfolgen und dadurch die Arbeitszeit exakt bestimmt wird.

In der Tabelle Stückzähler sind die Stückzahlaufzeichnungen mit der ValueID 103 aufgelistet. Zunächst wird die Dauer jeder Stückzahlaufzeichnung (in der Tabelle in der Spalte „delta“ eingetragen) bestimmt, indem eine Differenz zwischen dem Zeitpunkt der betrachteten Stückzahlaufzeichnung mit dem Zeitpunkt der vorigen Stückzahlaufzeichnung gebildet wird. Dabei müssen beide Stückzahlaufzeichnungen am selben Tag erfolgen, um eine Aussage über die Dauer treffen zu können.

ID	dt_data	MachinelD	ValueID	cum. Value	Value	date	cum. Value p	delta [min]
2	96098 27.07.2017 23:30:00	103	103	10264923	0	27.07.2017	0	0
3	96102 27.07.2017 23:36:00	103	103	10264923	0	27.07.2017	0	0
4	96121 28.07.2017 07:50:00	103	103	10264941	18	28.07.2017	18	0,00
5	96133 28.07.2017 07:55:00	103	103	10264942	1	28.07.2017	19	3,00
6	96150 28.07.2017 07:58:00	103	103	10264965	23	28.07.2017	42	2,00
7	96156 28.07.2017 08:00:00	103	103	10264976	11	28.07.2017	53	2,00

Abbildung 61: Berechnung der Dauer einer Stückzahlaufzeichnung

Die Arbeitszeit berechnet sich aus der Summe der Werte in der Spalte „delta“ und wird mit dem Buchstaben B (siehe Kapitel 2.2.7) abgekürzt. Sie besitzt für die Fehlerstatusknoten und den Maschinenstatusknoten den selben Wert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		Arbeitszeit [h]	Verfügbare BMZ [h]	Netto BMZ [h]	Nutz. BMZ [h]	Wertsch. BMZ [h]	Brutto-NG	Netto-NG	Leistungsg.	Qualitätsg.
2	Fehlerstatus M1	=SUMME(Stück	77,45	65,14	65,14	65,14	0,841080267	0,841080267	1	1
4	Fehlerstatus M2	77,45	77,45	76,21	74,79	74,79	0,984029123	0,984029123	0,98128784	1
5	Fehlerstatus M3	77,45	76,74	75,04	75,04	75,04	0,968936949	0,977905112	1	1
6	Fehlerstatus M4	77,45	77,45	27,49	27,49	27,49	0,354895632	0,354895632	1	1
7	Fehlerstatus M5	77,45	76,97	76,72	76,45	76,45	0,990631949	0,996856492	0,99642661	1
8	Maschinenzustand	77,45	76,77	76,77	76,77	76,77	0,991259594	1	1	1

ID	dt_data	MachinelD	ValueID	cum. Value	Value	date	cum. Value p	delta [min]
2	96098 27.07.2017 23:30:00	103	103	10264923	0	27.07.2017	0	0
3	96102 27.07.2017 23:36:00	103	103	10264923	0	27.07.2017	0	0
4	96121 28.07.2017 07:50:00	103	103	10264941	18	28.07.2017	18	0,00
5	96133 28.07.2017 07:55:00	103	103	10264942	1	28.07.2017	19	5,00
6	96150 28.07.2017 07:58:00	103	103	10264965	23	28.07.2017	42	3,00
7	96156 28.07.2017 08:00:00	103	103	10264976	11	28.07.2017	53	2,00
8	96160 28.07.2017 08:01:00	103	103	10264977	1	28.07.2017	54	1,00

Abbildung 62: Berechnung der Arbeitszeit (B)

Um den Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad für die Fehler- bzw. den Maschinenstatusknoten bestimmen zu können, werden die verfügbare Betriebsmittelzeit (C), die netto Betriebsmittelzeit (D), die nutzbringende Betriebsmittelzeit (E) und die wertschöpfende Betriebsmittelzeit (F) der Fehler- bzw. des Maschinenstatusknoten benötigt.

Den Ausgangspunkt bildet die zuvor ermittelte Arbeitszeit (B). Ein Abzug der geplanten Stillstände von dieser Zeit ergibt die verfügbare Betriebsmittelzeit (C). Die netto Betriebsmittelzeit (D) erhält man durch die Berücksichtigung der ungeplanten Stillstände. Um die nutzbare Betriebsmittelzeit (E) zu erhalten, werden von der netto Betriebsmittelzeit die Geschwindigkeitsverlustzeiten abgezogen. Durch Abzug der Qualitätsverluste gelangt man schlussendlich zur wertschöpfenden Betriebsmittelzeit (F) (siehe Tabelle 3).

Die Fehlerzustände der einzelnen Fehlerzustandskategorien und der Maschinenzustand „Rüstvorgang“ besitzen in der Spalte OEE Buchstaben, die sie den Verlusttypen für die Berechnung der Betriebsmittelzeiten zuordnen. Besitzt ein Fehler- bzw. Maschinenzustand für den betrachteten Fehler- bzw. Maschinenstatusknoten den selben

Buchstaben wie die betrachtete Betriebsmittelzeit, so stellt dieser Fehler- bzw. Maschinenzustand einen Fehlerzustand der betrachteten Betriebsmittelzeit dar (z.B. ist dem Fehlerzustand 103-210-4 in der Spalte OEE der Buchstabe D zugewiesen. Daher wird die Dauer dieses Fehlers bei Betrachtung des Fehlerstatusknoten M1 als Verlust bei der Berechnung der netto Betriebsmittelzeit (D) eingerechnet).

	A	B	C	D	E	F
1		Arbeitszeit [h]	Verfügbare BMZ [h]	Netto BMZ [h]	Nutz. BMZ [h]	Wertsch. BMZ [h]
2		B	C	D	E	F
3	Fehlerstatus M1	77,45	77,45	=SC3-SUMME	65,14	65,14
4	Fehlerstatus M2	77,45	77,45	76,21	74,79	74,79
5	Fehlerstatus M3	77,45	76,74	75,04	75,04	75,04
6	Fehlerstatus M4	77,45	77,45	27,49	27,49	27,49
7	Fehlerstatus M5	77,45	76,97	76,72	76,45	76,45
8	Maschinenzustand	77,45	76,77	76,77	76,77	76,77

Tabelle: Beschreibung											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	ID	MachineID	valueID	Value	Zustand ID	Beschreibung	Bereich/Instanz	Häufigkeit	Dauer [h]	Dauer pro Auftritt [min]	
6	28	103	210	1	103-210-1	NOT-AUS EIN	C	I	0	0	0
7	29	103	210	2	103-210-2	KEINE DRUCKLUFT	D	I	0	0	0
8	30	103	210	4	103-210-4	TUERE OFFEN	D	I	189	3,836944444	1,218077601
9	31	103	210	8	103-210-8	MOTOR-SCHUTZ AUSGELOEST	D	I	0	0	0
10	32	103	210	16	103-210-16	UMRICHTER "HAUPTMOTOR" STOERUNG	D	I	0	0	0
11	33	103	210	32	103-210-32	FREQUENZREGLER UEBERLASTUNG (OPTIONAL)	C	I	0	0	0
12	34	103	210	64	103-210-64	UEBERLAST PRODUKT-EINSCHUB	E	I	0	0	0
13	35	103	210	128	103-210-128	UEBERLAST BECHERKETTE	D	I	0	0	0
14	36	103	210	256	103-210-256	STOERUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	E	I	0	0	0
15	37	103	210	512	103-210-512	ZU VOLL AUSLAUFSTAU	E	I	0	0	0
16	38	103	210	1024	103-210-1024	24V SPANNUNG FEHLT	D	I	0	0	0
17	39	103	210	2048	103-210-2048	MIN. NIVEAUSTAND KARTONMAGAZIN	D	W	0	0	0
18	40	103	210	4096	103-210-4096	KARTON MAGAZIN LEER	C	I	0	0	0
19	41	103	210	8192	103-210-8192	FEHLER KARTONOFFNER	D	I	0	0	0
20	42	103	210	16384	103-210-16384	OBERE FUEHRUNG GEOFFNET	D	I	0	0	0
21	43	103	210	32768	103-210-32768	UMRICHTER "UEBERGABE" STOERUNG	E	I	0	0	0
22	44	103	210	0	103-210-0	Kein Fehler bei M1 aktiv!			542	49,64972222	5,496279213
23	45	103	210	*	103-210-*	Kein Bitwert zugeordnet	D	I	550	8,471388889	0,924151515

Abbildung 63: Berechnung der Betriebsmittelzeiten

Die Ergebnisse der Betriebsmittelzeiten finden sich in Tabelle 38 wieder.

Für die Berechnung der OEE wird der Brutto-Nutzungsgrad herangezogen, weil die geplanten Stillstände (z.B. Rüstzeiten, geplante Wartungen, . . .) im Modell berücksichtigt werden. Die Ermittlung von Brutto-Nutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad erfolgt laut Tabelle 4.

		F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch.
Arbeitszeit [h]	B	77,45	77,45	77,45	77,45	77,45	77,45
Verfügbare BMZ [h]	C	77,45	77,45	76,74	77,45	76,97	76,77
Netto BMZ [h]	D	65,14	76,21	75,04	27,49	76,72	76,77
Nutz. BMZ [h]	E	65,14	74,79	75,04	27,49	76,45	76,77
Wertschöpfende BMZ [h]	F	65,14	74,79	75,04	27,49	76,45	76,77
Brutto-Nutzungsgrad	D/B	0,84108	0,98403	0,96894	0,3549	0,99063	0,99126
Netto-Nutzungsgrad	D/C	0,84108	0,98403	0,97794	0,3549	0,99686	1
Leistungsgrad	E/D	1	0,98129	1	1	0,99643	1
Qualitätsgrad	F/E	1	1	1	1	1	1

Tabelle 38: Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad der Elternknoten

In weiterer Folge wird für den Brutto-Nutzungsgrad der allgemeine Begriff Nutzungsgrad verwendet.

▪ **Nutzungsgrad**

Der Nutzungsgrad wird für jede mögliche Zustandskombination der Elternknoten ermittelt, indem das arithmetische Mittel der Nutzungsgrade von jenen Elternknoten gebildet wird, die in der Zustandskombination den Wert 1 aufweisen.

In der CPT des Nutzungsgradknotens bilden die Zustände des Nutzungsgradknotens Prozentbereiche ab, in welche die Werte der ermittelten Nutzungsgrade der einzelnen Zustandskombinationen eingeordnet werden (farbig hinterlegter Bereich der Tabelle 39 und Tabelle 40).

Elternknoten	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch.	Brutto-Nutzungsgrad	Zustand des Nutzungsgrades				
								I	II	III	IV	
D/B	84,11%	98,40%	96,89%	35,49%	99,06%	99,13%		0 – 0,5	0,50001 – 0,7	0,70001 – 0,9	0,90001 – 1	
Zustandskombination	1	1	1	1	1	1	0	0,8279	0	0	1	0
	2	1	1	1	1	1	0	0,8279	0	0	1	0
	3	1	1	1	1	1	1	0,8551	0	0	1	0
	4	1	1	1	1	0	0	0,7872	0	0	1	0
	5	1	1	1	1	0	0	0,7872	0	0	1	0
	6	1	1	1	1	0	1	0,828	0	0	0	1
	7	1	1	1	0	1	0	0,9462	0	0	0	1
	8	1	1	1	0	1	0	0,9462	0	0	0	1
	9	1	1	1	0	1	1	0,9552	0	0	0	1
	10	1	1	1	0	0	0	0,9313	0	0	0	1
	11	1	1	1	0	0	0	0,9313	0	0	0	1
	12	1	1	1	0	0	1	0,9463	0	0	0	1
	13	1	1	0	1	1	0	0,7927	0	0	1	0
	14	1	1	0	1	1	0	0,7927	0	0	1	0
	15	1	1	0	1	1	1	0,8324	0	0	1	0
	16	1	1	0	1	0	0	0,7267	0	0	1	0
	17	1	1	0	1	0	0	0,7267	0	0	1	0
	18	1	1	0	1	0	1	0,7928	0	0	1	0
	19	1	1	0	0	1	0	0,9386	0	0	0	1
	20	1	1	0	0	1	0	0,9386	0	0	0	1
	21	1	1	0	0	1	1	0,9518	0	0	0	1
	22	1	1	0	0	0	0	0,9126	0	0	0	1
	23	1	1	0	0	0	0	0,9126	0	0	0	1
	24	1	1	0	0	0	1	0,9388	0	0	0	1
	25	1	0	1	1	1	0	0,7889	0	0	1	0
	26	1	0	1	1	1	0	0,7889	0	0	1	0
	27	1	0	1	1	1	1	0,8294	0	0	1	0
	28	1	0	1	1	0	0	0,7216	0	0	1	0
	29	1	0	1	1	0	0	0,7216	0	0	1	0
	30	1	0	1	1	0	1	0,789	0	0	1	0
	31	1	0	1	0	1	0	0,9335	0	0	0	1
	32	1	0	1	0	1	0	0,9335	0	0	0	1
	33	1	0	1	0	1	1	0,948	0	0	0	1
	34	1	0	1	0	0	0	0,905	0	0	0	1
	35	1	0	1	0	0	0	0,905	0	0	0	1
	36	1	0	1	0	0	1	0,9338	0	0	0	1
	37	1	0	0	1	1	0	0,7289	0	0	1	0
	38	1	0	0	1	1	0	0,7289	0	0	1	0
	39	1	0	0	1	1	1	0,7945	0	0	1	0
	40	1	0	0	1	0	0	0,598	0	1	0	0
	41	1	0	0	1	0	0	0,598	0	1	0	0
	42	1	0	0	1	0	1	0,7291	0	0	1	0
	43	1	0	0	0	1	0	0,9159	0	0	0	1
	44	1	0	0	0	1	0	0,9159	0	0	0	1
	45	1	0	0	0	1	1	0,941	0	0	0	1
	46	1	0	0	0	0	0	0,8411	0	0	1	0
	47	1	0	0	0	0	0	0,8411	0	0	1	0
	48	1	0	0	0	0	1	0,9162	0	0	0	1
	49	0	1	1	1	1	0	0,8246	0	0	1	0
	50	0	1	1	1	1	0	0,8246	0	0	1	0
	51	0	1	1	1	1	1	0,858	0	0	1	0
	52	0	1	1	1	0	0	0,7693	0	0	1	0
	53	0	1	1	1	0	0	0,7693	0	0	1	0
	54	0	1	1	1	0	1	0,8248	0	0	1	0
	55	0	1	1	0	1	0	0,9812	0	0	0	1
	56	0	1	1	0	1	0	0,9812	0	0	0	1
	57	0	1	1	0	1	1	0,9837	0	0	0	1
	58	0	1	1	0	0	0	0,9765	0	0	0	1

Tabelle 39: Die Netto-Nutzungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (I)

Elternknoten	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch.	Brutto-Nutzungsgrad	Zustand des Nutzungsgrades				
								I	II	III	IV	
D/B	84,11%	98,40%	96,89%	35,49%	99,06%	99,13%		0 - 0,5	0,50001 - 0,7	0,70001 - 0,9	0,90001 - 1	
Zustandskombination	59	0	1	1	0	0	0,9765	0	0	0	1	
	60	0	1	1	0	0	1	0,9814	0	0	0	1
	61	0	1	0	1	1	0	0,7765	0	0	1	0
	62	0	1	0	1	1	0	0,7765	0	0	1	0
	63	0	1	0	1	1	1	0,8302	0	0	1	0
	64	0	1	0	1	0	0	0,6695	0	1	0	0
	65	0	1	0	1	0	0	0,6695	0	1	0	0
	66	0	1	0	1	0	1	0,7767	0	0	1	0
	67	0	1	0	0	1	0	0,9873	0	0	0	1
	68	0	1	0	0	1	0	0,9873	0	0	0	1
	69	0	1	0	0	1	1	0,9886	0	0	0	1
	70	0	1	0	0	0	0	0,984	0	0	0	1
	71	0	1	0	0	0	0	0,984	0	0	0	1
	72	0	1	0	0	0	1	0,9876	0	0	0	1
	73	0	0	1	1	1	0	0,7715	0	0	1	0
	74	0	0	1	1	1	0	0,7715	0	0	1	0
	75	0	0	1	1	1	1	0,8264	0	0	1	0
	76	0	0	1	1	0	0	0,6619	0	1	0	0
	77	0	0	1	1	0	0	0,6619	0	1	0	0
	78	0	0	1	1	0	1	0,7717	0	0	1	0
	79	0	0	1	0	1	0	0,9798	0	0	0	1
	80	0	0	1	0	1	0	0,9798	0	0	0	1
	81	0	0	1	0	1	1	0,9836	0	0	0	1
	82	0	0	1	0	0	0	0,9689	0	0	0	1
	83	0	0	1	0	0	0	0,9689	0	0	0	1
	84	0	0	1	0	0	1	0,9801	0	0	0	1
	85	0	0	0	1	1	0	0,6728	0	1	0	0
	86	0	0	0	1	1	0	0,6728	0	1	0	0
	87	0	0	0	1	1	1	0,7789	0	0	1	0
	88	0	0	0	1	0	0	0,3549	1	0	0	0
	89	0	0	0	1	0	0	0,3549	1	0	0	0
	90	0	0	0	1	0	1	0,6731	0	1	0	0
	91	0	0	0	0	1	0	0,9906	0	0	0	1
	92	0	0	0	0	1	0	0,9906	0	0	0	1
	93	0	0	0	0	1	1	0,9909	0	0	0	1
	94	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
95	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
96	0	0	0	0	0	1	0,9913	0	0	0	1	

Tabelle 40: Die Netto-Nutzungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (II)

Die berechneten Werte der CPT werden in die CPT des Nutzungsgrad-Knotenpunktes eingetragen (siehe Kapitel 3.3.4.2). Das Programm GeNle SMILE berechnet mit Hilfe der Verteilungsfunktion des BN (Formel 28) automatisch die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des Nutzungsgrad-Knotenpunktes. Um diesen Vorgang nachvollziehen zu können, wird die im Programm hinterlegte Berechnung in weiterer Folge erläutert.

Für die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des MTTF Knotenpunktes (P[Zustand des Nutzungsgradknotens]) wird die Wahrscheinlichkeit für den Auftritt der einzelnen Zustandskombinationen benötigt (P[Zustandskombination]). Die Wahrscheinlichkeiten der Fehlerstatusknoten für den jeweiligen Zustand „Fehler“ (P[1]) und „kein Fehler“ (P[0]) sind in Tabelle 28 gegeben. Die Wahrscheinlichkeiten des Maschinenstatusknoten für den jeweiligen Zustand „Rüstvorgang“ (P[1]) bzw. „Maschine aktiviert“ / „Maschine aus“ (P[0]) sind ebenfalls in Tabelle 28 gegeben. Da sich die Zustandsbezeichnung 0 zwei Zustände teilt („Maschine aktiviert“ bzw. „Maschine aus“), wird die Wahrscheinlichkeit P[0] für den Maschinenstatusknoten wie folgt berechnet:

$$P[0] = 1 - \frac{P[1]}{2}$$

P[Zustandskombination] berechnet sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten.

Kategorie	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch	P[Zustandskombination]	
P[1]	0,1987	0,0439	0,0437	0,8196	0,0168	0,0100		
P[0]	0,8013	0,9561	0,9563	0,1804	0,9832	0,4950		
Zustandskombination	1	1	1	1	1	0	2,6E-06	
	2	1	1	1	1	0	2,6E-06	
	3	1	1	1	1	1	5,3E-08	
	4	1	1	1	1	0	0,00015	
	5	1	1	1	1	0	0,00015	
	6	1	1	1	1	0	3,1E-06	
	7	1	1	1	0	1	5,7E-07	
	8	1	1	1	0	1	5,7E-07	
	9	1	1	1	0	1	1,2E-08	
	10	1	1	1	0	0	3,3E-05	
	11	1	1	1	0	0	3,3E-05	
	12	1	1	1	0	0	6,8E-07	
	13	1	1	0	1	1	5,7E-05	
	14	1	1	0	1	1	5,7E-05	
	15	1	1	0	1	1	1,2E-06	
	16	1	1	0	1	0	0,00333	
	17	1	1	0	1	0	0,00333	
	18	1	1	0	1	0	6,7E-05	
	19	1	1	0	0	1	1,3E-05	
	20	1	1	0	0	1	1,3E-05	
	21	1	1	0	0	1	2,5E-07	
	22	1	1	0	0	0	0,00073	
	23	1	1	0	0	0	0,00073	
	24	1	1	0	0	0	1,5E-05	
	25	1	0	1	1	1	5,7E-05	
	26	1	0	1	1	1	5,7E-05	
	27	1	0	1	1	1	1,1E-06	
	28	1	0	1	1	0	0,00331	
	29	1	0	1	1	0	0,00331	
	30	1	0	1	1	0	6,7E-05	
	31	1	0	1	0	1	1,2E-05	
	32	1	0	1	0	1	1,2E-05	
	33	1	0	1	0	1	2,5E-07	
	34	1	0	1	0	0	0,00073	
	35	1	0	1	0	0	0,00073	
	36	1	0	1	0	0	1,5E-05	
	37	1	0	0	1	1	0,00124	
	38	1	0	0	1	1	0,00124	
	39	1	0	0	1	1	2,5E-05	
	40	1	0	0	1	0	0,07245	
	41	1	0	0	1	0	0,07245	
	42	1	0	0	1	0	0,00146	
	43	1	0	0	0	1	0,00027	
	44	1	0	0	0	1	0,00027	
	45	1	0	0	0	1	5,5E-06	
	46	1	0	0	0	0	0,01595	
	47	1	0	0	0	0	0,01595	
	48	1	0	0	0	0	0,00032	
	49	0	1	1	1	1	0	1,1E-05
	50	0	1	1	1	1	0	1,1E-05
	51	0	1	1	1	1	1	2,1E-07
	52	0	1	1	1	0	0	0,00061
	53	0	1	1	1	0	0	0,00061
	54	0	1	1	1	0	1	1,2E-05
	55	0	1	1	0	1	0	2,3E-06
	56	0	1	1	0	1	0	2,3E-06
	57	0	1	1	0	1	1	4,7E-08
	58	0	1	1	0	0	0	0,00013
	59	0	1	1	0	0	0	0,00013
	60	0	1	1	0	0	1	2,7E-06
	61	0	1	0	1	1	0	0,00023
	62	0	1	0	1	1	0	0,00023
	63	0	1	0	1	1	1	4,6E-06
	64	0	1	0	1	0	0	0,01343
	65	0	1	0	1	0	0	0,01343
	66	0	1	0	1	0	1	0,00027
	67	0	1	0	0	1	0	5,1E-05
	68	0	1	0	0	1	0	5,1E-05
	69	0	1	0	0	1	1	1E-06
	70	0	1	0	0	0	0	0,00296
	71	0	1	0	0	0	0	0,00296
	72	0	1	0	0	0	1	6E-05
	73	0	0	1	1	1	0	0,00023
	74	0	0	1	1	1	0	0,00023
	75	0	0	1	1	1	1	4,6E-06
	76	0	0	1	1	0	0	0,01334
	77	0	0	1	1	0	0	0,01334
	78	0	0	1	1	0	1	0,00027
	79	0	0	1	0	1	0	5E-05
	80	0	0	1	0	1	0	5E-05
	81	0	0	1	0	1	1	1E-06
	82	0	0	1	0	0	0	0,00294
	83	0	0	1	0	0	0	0,00294
	84	0	0	1	0	0	1	5,9E-05
	85	0	0	0	1	1	0	0,00501

Tabelle 41: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrades (I)

Kategorie	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch	P[Zustandskombination]	
P[1]	0,1987	0,0439	0,0437	0,8196	0,0168	0,0100		
P[0]	0,8013	0,9561	0,9563	0,1804	0,9832	0,4950		
Zustandskombination	86	0	0	0	1	1	0	0,00501
	87	0	0	0	1	1	1	0,0001
	88	0	0	0	1	0	0	0,29223
	89	0	0	0	1	0	0	0,29223
	90	0	0	0	1	0	1	0,00591
	91	0	0	0	0	1	0	0,0011
	92	0	0	0	0	1	0	0,0011
	93	0	0	0	0	1	1	2,2E-05
	94	0	0	0	0	0	0	0,06434
	95	0	0	0	0	0	0	0,06434
96	0	0	0	0	0	1	0,0013	

Tabelle 42: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrades (II)

Die Zellen der CPT des betrachteten Knotenpunktes Nutzungsgrad werden mit den zugehörigen Werten der P[Zustandskombination] multipliziert. Dadurch erhält man die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes des Nutzungsgrad-Knotenpunktes für eine betrachtete Zustandskombination (P[Zustand des MTTF | Zustandskombination]).

	P[Zustandskombination]	Zustand des Nutzungsgradknotens				P[Zustand des Nutz   Zustandskombination]				
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Zustandskombination	1	2,6E-06	0	0	1	0	0	0	2,6E-06	0
	2	2,6E-06	0	0	1	0	0	0	2,6E-06	0
	3	5,3E-08	0	0	1	0	0	0	5,3E-08	0
	4	0,00015	0	0	1	0	0	0	0,00015	0
	5	0,00015	0	0	1	0	0	0	0,00015	0
	6	3,1E-06	0	0	1	0	0	0	3,1E-06	0
	7	5,7E-07	0	0	0	1	0	0	0	6E-07
	8	5,7E-07	0	0	0	1	0	0	0	6E-07
	9	1,2E-08	0	0	0	1	0	0	0	1E-08
	10	3,3E-05	0	0	0	1	0	0	0	3E-05
	11	3,3E-05	0	0	0	1	0	0	0	3E-05
	12	6,8E-07	0	0	0	1	0	0	0	7E-07
	13	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	14	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	15	1,2E-06	0	0	1	0	0	0	1,2E-06	0
	16	0,00333	0	0	1	0	0	0	0,00333	0
	17	0,00333	0	0	1	0	0	0	0,00333	0
	18	6,7E-05	0	0	1	0	0	0	6,7E-05	0
	19	1,3E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	20	1,3E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	21	2,5E-07	0	0	0	1	0	0	0	3E-07
	22	0,00073	0	0	0	1	0	0	0	0,0007
	23	0,00073	0	0	0	1	0	0	0	0,0007
	24	1,5E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	25	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	26	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	27	1,1E-06	0	0	1	0	0	0	1,1E-06	0
	28	0,00331	0	0	1	0	0	0	0,00331	0
	29	0,00331	0	0	1	0	0	0	0,00331	0
	30	6,7E-05	0	0	1	0	0	0	6,7E-05	0
	31	1,2E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	32	1,2E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	33	2,5E-07	0	0	0	1	0	0	0	3E-07
	34	0,00073	0	0	0	1	0	0	0	0,0007
	35	0,00073	0	0	0	1	0	0	0	0,0007
	36	1,5E-05	0	0	0	1	0	0	0	1E-05
	37	0,00124	0	0	1	0	0	0	0,00124	0
	38	0,00124	0	0	1	0	0	0	0,00124	0
	39	2,5E-05	0	0	1	0	0	0	2,5E-05	0
	40	0,07245	0	1	0	0	0	0,07245	0	0
	41	0,07245	0	1	0	0	0	0,07245	0	0
	42	0,00146	0	0	1	0	0	0	0,00146	0
	43	0,00027	0	0	0	1	0	0	0	0,0003
	44	0,00027	0	0	0	1	0	0	0	0,0003
	45	5,5E-06	0	0	0	1	0	0	0	6E-06
	46	0,01595	0	0	1	0	0	0	0,01595	0
	47	0,01595	0	0	1	0	0	0	0,01595	0
	48	0,00032	0	0	0	1	0	0	0	0,0003
	49	1,1E-05	0	0	1	0	0	0	1,1E-05	0
	50	1,1E-05	0	0	1	0	0	0	1,1E-05	0
	51	2,1E-07	0	0	1	0	0	0	2,1E-07	0
	52	0,00061	0	0	1	0	0	0	0,00061	0
	53	0,00061	0	0	1	0	0	0	0,00061	0
	54	1,2E-05	0	0	1	0	0	0	1,2E-05	0
	55	2,3E-06	0	0	0	1	0	0	0	2E-06

Tabelle 43: Zustandswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrad Knotenpunktes (I)

	P[Zustandskombination]	Zustand des Nutzungsgradknotens				P[Zustand des Nutz   Zustandskombination]				
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Zustandskombination	56	2,3E-06	0	0	0	1	0	0	0	2E-06
	57	4,7E-08	0	0	0	1	0	0	0	5E-08
	58	0,00013	0	0	0	1	0	0	0	0,0001
	59	0,00013	0	0	0	1	0	0	0	0,0001
	60	2,7E-06	0	0	0	1	0	0	0	3E-06
	61	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	62	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	63	4,6E-06	0	0	1	0	0	0	4,6E-06	0
	64	0,01343	0	1	0	0	0	0,01343	0	0
	65	0,01343	0	1	0	0	0	0,01343	0	0
	66	0,00027	0	0	1	0	0	0	0,00027	0
	67	5,1E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	68	5,1E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	69	1E-06	0	0	0	1	0	0	0	1E-06
	70	0,00296	0	0	0	1	0	0	0	0,003
	71	0,00296	0	0	0	1	0	0	0	0,003
	72	6E-05	0	0	0	1	0	0	0	6E-05
	73	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	74	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	75	4,6E-06	0	0	1	0	0	0	4,6E-06	0
	76	0,01334	0	1	0	0	0	0,01334	0	0
	77	0,01334	0	1	0	0	0	0,01334	0	0
	78	0,00027	0	0	1	0	0	0	0,00027	0
	79	5E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	80	5E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	81	1E-06	0	0	0	1	0	0	0	1E-06
	82	0,00294	0	0	0	1	0	0	0	0,0029
	83	0,00294	0	0	0	1	0	0	0	0,0029
84	5,9E-05	0	0	0	1	0	0	0	6E-05	
85	0,00501	0	1	0	0	0	0,00501	0	0	
86	0,00501	0	1	0	0	0	0,00501	0	0	
87	0,0001	0	0	1	0	0	0	0,0001	0	
88	0,29223	1	0	0	0	0,29223	0	0	0	
89	0,29223	1	0	0	0	0,29223	0	0	0	
90	0,00591	0	1	0	0	0	0,00591	0	0	
91	0,0011	0	0	0	1	0	0	0	0,0011	
92	0,0011	0	0	0	1	0	0	0	0,0011	
93	2,2E-05	0	0	0	1	0	0	0	2E-05	
94	0,06434	0	0	0	1	0	0	0	0,0643	
95	0,06434	0	0	0	1	0	0	0	0,0643	
96	0,0013	0	0	0	1	0	0	0	0,0013	
<b>P[Zustand des Nutzungsgradknotens]</b>						<b>0,5845</b>	<b>0,2144</b>	<b>0,053</b>	<b>0,149</b>	

Tabelle 44: Zustandswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrad Knotenpunktes (II)

Durch spaltenweise Addition der P[Zustand des Nutz | Zustandskombination] wird die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes des Nutzungsgrad-Knotenpunktes (P[Zustand des Nutzungsgradknotens]) berechnet. Diese finden sich als Prozentzahlen im Knotenpunkt Nutzungsgrad des BN (siehe Abbildung 64) wieder.

▪ **Leistungsgrad**

Die Berechnung des Leistungsknotens folgt demselben Schema. Die Ergebnisse befinden sich in den weiteren Tabellen.

Elternknoten	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch.	Leistungsgrad	Zustand des Leistungsgrades				
								I	II	III	IV	
E/D	100%	98,13%	100%	100%	99,64%	100%	0,9955	0 - 0,98	0,98001 - 0,99	0,99001 - 0,995	0,99501 - 1	
Zustandskombination	1	1	1	1	1	0	0,9955	0	0	0	1	
	2	1	1	1	1	1	0,9955	0	0	0	1	
	3	1	1	1	1	1	0,9963	0	0	0	1	
	4	1	1	1	1	0	0,9953	0	0	0	1	
	5	1	1	1	1	0	0,9953	0	0	0	1	
	6	1	1	1	1	0	1	0,9963	0	0	0	1
	7	1	1	1	0	1	0	0,9944	0	0	1	0
	8	1	1	1	0	1	0	0,9944	0	0	1	0
	9	1	1	1	0	1	1	0,9955	0	0	0	1
	10	1	1	1	0	0	0	0,9938	0	0	1	0
	11	1	1	1	0	0	0	0,9938	0	0	1	0
	12	1	1	1	0	0	1	0,9953	0	0	0	1
	13	1	1	0	1	1	0	0,9944	0	0	1	0
	14	1	1	0	1	1	0	0,9944	0	0	1	0
	15	1	1	0	1	1	1	0,9955	0	0	0	1

Tabelle 45: Die Leistungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (I)

Eltern-knoten	F. M1	F. M2	F. M3	F. M4	F. M5	Masch.	Leistungs-grad	Zustand des Leistungsgrades				
								I	II	III	IV	
E/D	100%	98,13%	100%	100%	99,64%	100%		0 - 0,98	0,98001 - 0,99	0,99001 - 0,995	0,99501 - 1	
Zustandskombination	16	1	1	0	1	0	0	0,9938	0	0	1	0
	17	1	1	0	1	0	0	0,9938	0	0	1	0
	18	1	1	0	1	0	1	0,9953	0	0	0	1
	19	1	1	0	0	1	0	0,9926	0	0	1	0
	20	1	1	0	0	1	0	0,9926	0	0	1	0
	21	1	1	0	0	1	1	0,9944	0	0	1	0
	22	1	1	0	0	0	0	0,9906	0	0	1	0
	23	1	1	0	0	0	0	0,9906	0	0	1	0
	24	1	1	0	0	0	1	0,9938	0	0	1	0
	25	1	0	1	1	1	0	0,9991	0	0	0	1
	26	1	0	1	1	1	0	0,9991	0	0	0	1
	27	1	0	1	1	1	1	0,9993	0	0	0	1
	28	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
	29	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
	30	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
	31	1	0	1	0	1	0	0,9988	0	0	0	1
	32	1	0	1	0	1	0	0,9988	0	0	0	1
	33	1	0	1	0	1	1	0,9991	0	0	0	1
	34	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	35	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	36	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
	37	1	0	0	1	1	0	0,9988	0	0	0	1
	38	1	0	0	1	1	0	0,9988	0	0	0	1
	39	1	0	0	1	1	1	0,9991	0	0	0	1
	40	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	41	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	42	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
	43	1	0	0	0	1	0	0,9982	0	0	0	1
	44	1	0	0	0	1	0	0,9982	0	0	0	1
	45	1	0	0	0	1	1	0,9988	0	0	0	1
	46	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	47	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	48	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
	49	0	1	1	1	1	0	0,9944	0	0	1	0
	50	0	1	1	1	1	0	0,9944	0	0	1	0
	51	0	1	1	1	1	1	0,9955	0	0	0	1
	52	0	1	1	1	0	0	0,9938	0	0	1	0
	53	0	1	1	1	0	0	0,9938	0	0	1	0
	54	0	1	1	1	0	1	0,9953	0	0	0	1
	55	0	1	1	0	1	0	0,9926	0	0	1	0
	56	0	1	1	0	1	0	0,9926	0	0	1	0
	57	0	1	1	0	1	1	0,9944	0	0	1	0
	58	0	1	1	0	0	0	0,9906	0	0	1	0
	59	0	1	1	0	0	0	0,9906	0	0	1	0
	60	0	1	1	0	0	1	0,9938	0	0	1	0
	61	0	1	0	1	1	0	0,9926	0	0	1	0
	62	0	1	0	1	1	0	0,9926	0	0	1	0
	63	0	1	0	1	1	1	0,9944	0	0	1	0
	64	0	1	0	1	0	0	0,9906	0	0	1	0
	65	0	1	0	1	0	0	0,9906	0	0	1	0
	66	0	1	0	1	0	1	0,9938	0	0	1	0
	67	0	1	0	0	1	0	0,9889	0	1	0	0
	68	0	1	0	0	1	0	0,9889	0	1	0	0
	69	0	1	0	0	1	1	0,9926	0	0	1	0
	70	0	1	0	0	0	0	0,9813	0	1	0	0
	71	0	1	0	0	0	0	0,9813	0	1	0	0
	72	0	1	0	0	0	1	0,9906	0	0	1	0
	73	0	0	1	1	1	0	0,9988	0	0	0	1
	74	0	0	1	1	1	0	0,9988	0	0	0	1
	75	0	0	1	1	1	1	0,9991	0	0	0	1
	76	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
	77	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
	78	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
	79	0	0	1	0	1	0	0,9982	0	0	0	1
	80	0	0	1	0	1	0	0,9982	0	0	0	1
	81	0	0	1	0	1	1	0,9988	0	0	0	1
	82	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	83	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	84	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
	85	0	0	0	1	1	0	0,9982	0	0	0	1
	86	0	0	0	1	1	0	0,9982	0	0	0	1
	87	0	0	0	1	1	1	0,9988	0	0	0	1
	88	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	89	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	90	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
	91	0	0	0	0	1	0	0,9964	0	0	0	1
	92	0	0	0	0	1	0	0,9964	0	0	0	1
	93	0	0	0	0	1	1	0,9982	0	0	0	1
	94	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	95	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	96	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1

Tabelle 46: Die Leistungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (II)

Die Tabelle zur Ermittlung von den Wahrscheinlichkeiten der Zustandskombinationen des Leistungsgrad-Knotenpunktes ist ident mit Tabelle 47. Sie wird somit an dieser Stelle nicht noch einmal angeführt.

	P[Zustandskombination]	Zustand des Leistungsknotens				P[Zustand des Leist   Zustandskombination]				
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Zustandskombination	1	2,6E-06	0	0	0	1	0	0	0	2,6E-06
	2	2,6E-06	0	0	0	1	0	0	0	2,6E-06
	3	5,26E-08	0	0	0	1	0	0	0	5,3E-08
	4	0,000152	0	0	0	1	0	0	0	0,00015
	5	0,000152	0	0	0	1	0	0	0	0,00015
	6	3,07E-06	0	0	0	1	0	0	0	3,1E-06
	7	5,73E-07	0	0	1	0	0	0	5,73E-07	0
	8	5,73E-07	0	0	1	0	0	0	5,73E-07	0
	9	1,16E-08	0	0	0	1	0	0	0	1,2E-08
	10	3,35E-05	0	0	1	0	0	0	3,35E-05	0
	11	3,35E-05	0	0	1	0	0	0	3,35E-05	0
	12	6,76E-07	0	0	0	1	0	0	0	6,8E-07
	13	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	14	5,7E-05	0	0	1	0	0	0	5,7E-05	0
	15	1,15E-06	0	0	0	1	0	0	0	1,2E-06
	16	0,003329	0	0	1	0	0	0	0,003329	0
	17	0,003329	0	0	1	0	0	0	0,003329	0
	18	6,73E-05	0	0	0	1	0	0	0	6,7E-05
	19	1,26E-05	0	0	1	0	0	0	1,26E-05	0
	20	1,26E-05	0	0	1	0	0	0	1,26E-05	0
	21	2,54E-07	0	0	1	0	0	0	2,54E-07	0
	22	0,000733	0	0	1	0	0	0	0,000733	0
	23	0,000733	0	0	1	0	0	0	0,000733	0
	24	1,48E-05	0	0	1	0	0	0	1,48E-05	0
	25	5,67E-05	0	0	0	1	0	0	0	5,7E-05
	26	5,67E-05	0	0	0	1	0	0	0	5,7E-05
	27	1,15E-06	0	0	0	1	0	0	0	1,1E-06
	28	0,003308	0	0	0	1	0	0	0	0,00331
	29	0,003308	0	0	0	1	0	0	0	0,00331
	30	6,69E-05	0	0	0	1	0	0	0	6,7E-05
	31	1,25E-05	0	0	0	1	0	0	0	1,2E-05
	32	1,25E-05	0	0	0	1	0	0	0	1,2E-05
	33	2,52E-07	0	0	0	1	0	0	0	2,5E-07
	34	0,000728	0	0	0	1	0	0	0	0,00073
	35	0,000728	0	0	0	1	0	0	0	0,00073
	36	1,47E-05	0	0	0	1	0	0	0	1,5E-05
	37	0,001241	0	0	0	1	0	0	0	0,00124
	38	0,001241	0	0	0	1	0	0	0	0,00124
	39	2,51E-05	0	0	0	1	0	0	0	2,5E-05
	40	0,072446	0	0	0	1	0	0	0	0,07245
	41	0,072446	0	0	0	1	0	0	0	0,07245
	42	0,001464	0	0	0	1	0	0	0	0,00146
	43	0,000273	0	0	0	1	0	0	0	0,00027
	44	0,000273	0	0	0	1	0	0	0	0,00027
	45	5,52E-06	0	0	0	1	0	0	0	5,5E-06
	46	0,015949	0	0	0	1	0	0	0	0,01595
	47	0,015949	0	0	0	1	0	0	0	0,01595
	48	0,000322	0	0	0	1	0	0	0	0,00032
	49	1,05E-05	0	0	1	0	0	0	1,05E-05	0
	50	1,05E-05	0	0	1	0	0	0	1,05E-05	0
	51	2,12E-07	0	0	0	1	0	0	0	2,1E-07
	52	0,000613	0	0	1	0	0	0	0,000613	0
	53	0,000613	0	0	1	0	0	0	0,000613	0
	54	1,24E-05	0	0	0	1	0	0	0	1,2E-05
	55	2,31E-06	0	0	1	0	0	0	2,31E-06	0
	56	2,31E-06	0	0	1	0	0	0	2,31E-06	0
	57	4,67E-08	0	0	1	0	0	0	4,67E-08	0
	58	0,000135	0	0	1	0	0	0	0,000135	0
	59	0,000135	0	0	1	0	0	0	0,000135	0
	60	2,73E-06	0	0	1	0	0	0	2,73E-06	0
	61	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	62	0,00023	0	0	1	0	0	0	0,00023	0
	63	4,65E-06	0	0	1	0	0	0	4,65E-06	0
	64	0,013427	0	0	1	0	0	0	0,013427	0
	65	0,013427	0	0	1	0	0	0	0,013427	0
	66	0,000271	0	0	1	0	0	0	0,000271	0
	67	5,06E-05	0	1	0	0	0	5,1E-05	0	0
	68	5,06E-05	0	1	0	0	0	5,1E-05	0	0
	69	1,02E-06	0	0	1	0	0	0	1,02E-06	0
	70	0,002956	0	1	0	0	0	0,00296	0	0
	71	0,002956	0	1	0	0	0	0,00296	0	0
	72	5,97E-05	0	0	1	0	0	0	5,97E-05	0
	73	0,000229	0	0	0	1	0	0	0	0,00023
	74	0,000229	0	0	0	1	0	0	0	0,00023
	75	4,62E-06	0	0	0	1	0	0	0	4,6E-06

Tabelle 47: Zustandswahrscheinlichkeit des Leistungsgrad Knotenpunktes (I)

	P[Zustandskombination]	Zustand des Leistungsknotens				P[Zustand des Leist   Zustandskombination]				
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Zustandskombination	76	0,013344	0	0	0	1	0	0	0	0,013344
	77	0,013344	0	0	0	1	0	0	0	0,013344
	78	0,00027	0	0	0	1	0	0	0	0,00027
	79	5,03E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	80	5,03E-05	0	0	0	1	0	0	0	5E-05
	81	1,02E-06	0	0	0	1	0	0	0	1E-06
	82	0,002938	0	0	0	1	0	0	0	0,00294
	83	0,002938	0	0	0	1	0	0	0	0,00294
	84	5,94E-05	0	0	0	1	0	0	0	5,9E-05
	85	0,005006	0	0	0	1	0	0	0	0,00501
	86	0,005006	0	0	0	1	0	0	0	0,00501
	87	0,000101	0	0	0	1	0	0	0	0,0001
	88	0,292234	0	0	0	1	0	0	0	0,29223
	89	0,292234	0	0	0	1	0	0	0	0,29223
	90	0,005906	0	0	0	1	0	0	0	0,00591
	91	0,001102	0	0	0	1	0	0	0	0,0011
	92	0,001102	0	0	0	1	0	0	0	0,0011
93	2,23E-05	0	0	0	1	0	0	0	2,2E-05	
94	0,064335	0	0	0	1	0	0	0	0,06434	
95	0,064335	0	0	0	1	0	0	0	0,06434	
96	0,0013	0	0	0	1	0	0	0	0,0013	
<b>P[Zustand des Leistungsgradknotens]</b>							<b>0</b>	<b>0,006</b>	<b>0,0375</b>	<b>0,9565</b>

Tabelle 48: Zustandswahrscheinlichkeit des Leistungsgrad Knotenpunktes (II)

▪ **Qualitätsgrad**

In den Daten, die als Basis für das Modell dienen, werden keine Qualitätsunterschiede aufgezeichnet. Außerdem findet das Thema Ausschuss bzw. Nacharbeit keinerlei Berücksichtigung. Daher ist der Qualitätsgrad für die Elternknoten des Qualitätsgrad-Knotenpunktes stets 1. Durch diese Tatsache wird eine weitere Berechnung überflüssig, da die Wahrscheinlichkeit für den Qualitätsgrad-Knotenpunkt den Wert 1 annimmt.

**3.3.6.5 CPT der RI/PIs**

Die gesammelten Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der RI/PI-Ebene befinden sich in der nachfolgenden Tabelle:

Knoten	Zustand	Wahrscheinlichkeitswert
MTTF	0 min	0 %
	0,0001 – 1,5 min	18,49 %
	1,50001 – 3 min	81,12 %
	> 3 min	0,22 %
MTTR	0 min	13 %
	0,0001 – 0,5 min	1,47 %
	0,50001 – 1,5 min	11,86 %
	> 1,5 min	73,67 %
MTTPM	0 min	90,52 %
	0,0001 – 0,5 min	8,48 %
	0,50001 – 1,5 min	0,26 %
	> 1,5 min	0,73 %
Nutzungsgrad	0 – 0,5	58,45 %
	0,50001 – 0,7	21,44 %
	0,70001 – 0,9	5,26 %
	0,90001 – 1	14,85 %
Leistungsgrad	0 – 0,98	0 %
	0,98001 – 0,99	0,60 %
	0,99001 – 0,995	3,75 %
	0,99501 – 1	95,65 %
Qualitätsgrad	0 – 0,33	0 %
	0,33001 – 0,66	0 %
	0,66001 – 0,9999	0 %
	1	100 %

Tabelle 49: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der RI/PI-Ebene

Nachdem die CPTs der RI/PI-Ebene befüllt sind, wird das Modell aktualisiert. Dadurch werden die Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände jedes Knotenpunktes über Balken visualisiert:

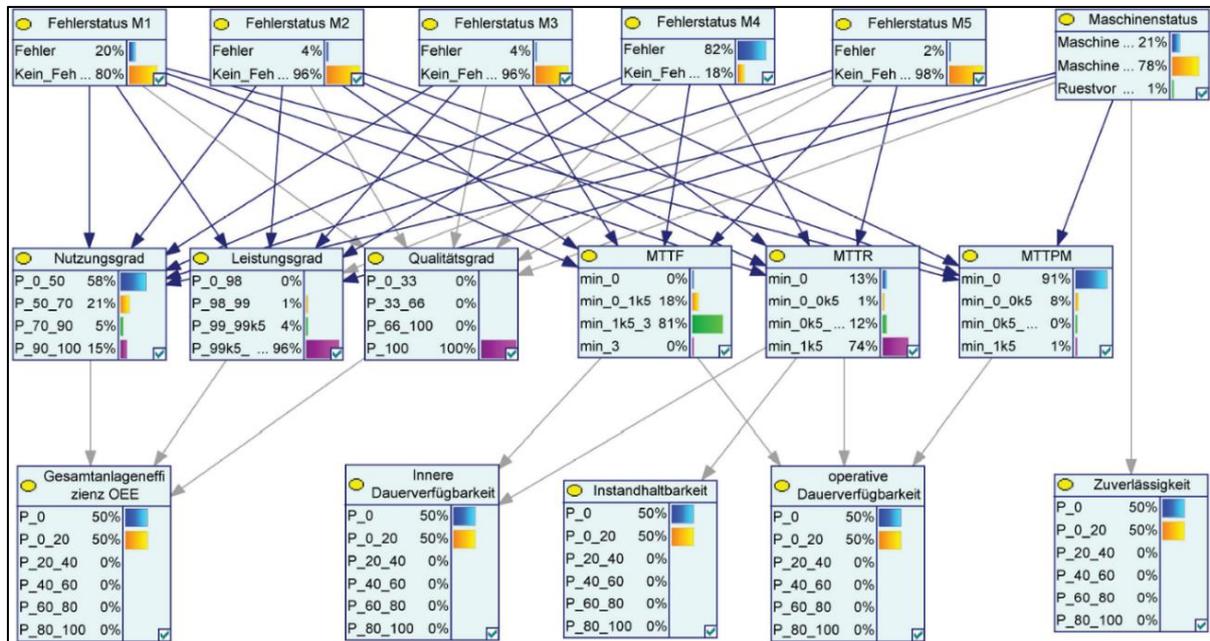


Abbildung 64: Visualisierte Zustände der RI/PI-Ebene

### 3.3.7 Ermittlung der Wahrscheinlichkeitswerte der KPIs

Die Knoten der RI/PI-Ebene sind Elternknoten der KPI-Knoten und fließen direkt in die Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte der KPIs ein. Die RI/PI-Knoten können somit als Ursache auf die Wirkung der Knoten aus der KPI-Ebene gesehen werden. Die kausalen Beziehungen der einzelnen Knoten sind in Tabelle 22 aufgelistet.

Die Zustände der Elternknoten befinden sich in der folgenden Tabelle:

Zustand	Nutzungsgrad		Leistungsgrad		Qualitätsgrad		MTTF [min]		MTTR [min]		MTTPM [min]	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	0	0,5	0	0,98	0	0,33	0	0	0	0	0	0
2	0,5	0,7	0,98001	0,99	0,33001	0,66	0	1,5	1E-04	0,5	1E-04	0,5
3	0,7	0,9	0,99001	0,995	0,66001	0,99999	1,5	3	0,5	1,5	0,5	1,5
4	0,9	1	0,99501	1	1	1	3	5,4963	1,5	2,839	1,5	2,138

Tabelle 50: Zustände der RI/PI-Knoten und ihre Bereiche

#### 3.3.7.1 Innere Dauerverfügbarkeit

Es gilt die CPT-Zellen des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um zwei Elternknoten mit je vier möglichen Zuständen. Die Spaltenanzahl errechnet sich somit wie folgt:

$$\text{Spaltenanzahl der inneren Dauerverfügbarkeit-CPT} = 4 * 4 = 16$$

**Formel 34: Berechnung der Spaltenanzahl der inneren Dauerverfügbarkeit-CPT**

Um die CPT des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit befüllen zu können, werden die minimale und maximale innere Dauerverfügbarkeit für jede Zustandskombination der Elternknoten berechnet. Zur Berechnung der minimalen inneren Dauerverfügbarkeit einer Zustandskombination wird der minimale Wert der MTTF und der maximale Wert der MTTR an Formel 22 angewandt. Setzt man in diese Formel den maximalen Wert der MTTF und den minimalen Wert der MTTR ein, so erhält man die maximale innere Dauerverfügbarkeit der Zustandskombination.

Zustand		MTTF		MTR		MTTPM		I. Dauerverfügbarkeit		O. Dauerverfügbarkeit		Instandhaltbarkeit		CPT des Knotens MTTPM
1	2	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
1	0	0	0	0	0	0	0	I	0	0	0	0	0	
2	0	1,5	1E-04	0,5	1E-04	0,5		II	0,00001	0,2	0,00001	0,2	0,00001	0,2
3	1,5	3	0,5	1,5	0,5	1,5		III	0,20001	0,4	0,20001	0,4	0,20001	0,4
4	3	5,4963	1,5	2,839	1,5	2,138		IV	0,40001	0,6	0,40001	0,6	0,40001	0,6
								V	0,60001	0,8	0,60001	0,8	0,60001	0,8
								VI	0,80001	1	0,80001	1	0,80001	1

		Zustandskombination															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
13	MTTF	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
14	MTR	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
15	L. Dauerverfügbarkeit min	=WENN	0	0	0	1	0,0002	7E-05	3,522E-05	1	0,75	0,5	0,3457157	1	0,85714	0,666667	0,5138
16	L. Dauerverfügbarkeit max	0	0	0	0	1	0,9999	0,75	0,5	1	0,999966668	0,857142857	0,6666667	1	0,99998	0,91661	0,7856

**Abbildung 65: Die innere Dauerverfügbarkeit der Zustandskombinationen**

Die Berechnungsergebnisse der minimalen und maximalen inneren Dauerverfügbarkeit der einzelnen Zustandskombinationen befinden sich in den mittleren Spalten der Tabelle 51.

Die Zeilenanzahl der CPT wird durch die Zustandsanzahl des Knotens innere Dauerverfügbarkeit vorgegeben. Bei den Zuständen des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit (mit den Ziffern I bis VI in der transponierten CPT der Tabelle 51 abgekürzt) handelt es sich um prozentuelle Bereiche.

Für die Befüllung der CPT werden die berechneten minimalen und maximalen inneren Dauerverfügbarkeiten betrachtet. Diese beiden Werte ergeben einen Bereich, in dem der tatsächliche Wert der inneren Dauerverfügbarkeit für die betrachtete Zustandskombination liegen wird. Es gilt diesen Bereich in die Zustände des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit einzuordnen. Enthält ein Zustand des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit eine Teilmenge des Bereiches der inneren Dauerverfügbarkeit, so wird der Anteil dieser Teilmenge in der CPT berücksichtigt. Die Summe der Anteile jeder Zustandskombination ergibt wieder den Wert 1.

VERWEIS  $\times$   $\checkmark$   $f_x$   $=\text{WENN}(\text{I16}=0;0;\text{WENN}(\text{I15}>\$L\$4;0;\text{WENN}(\text{I16}<=\$K\$4;0;\text{WENN}(\$L\$4-\text{I15}<0,1999;(\$L\$4-\text{I15})/(\text{I16}-\text{I15});\text{WENN}(\text{I16}>\$L\$4;(\$L\$4-\$K\$4)/(\text{I16}-\text{I15});(\text{I16}-\$K\$4)/(\text{I16}-\text{I15}))))))$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		MTTF		MTR		MTTPM				Zustand	I. Dauerverfügbarkeit		O. Dauerverfügbarkeit		Instandhaltbarkeit				
2	Zustand	min	max	min	max	min	max			min	max	min	max	min	max				
3	1	0	0	0	0	0	0			I	0	0	0	0	0	0			
4	2	0	1,5	1E-04	0,5	1E-04	0,5			II	0,00001	0,2	0,00001	0,2	0,00001	0,2			
5	3	1,5	3	0,5	1,5	0,5	1,5			III	0,20001	0,4	0,20001	0,4	0,20001	0,4			
6	4	3	5,4963	1,5	2,839	1,5	2,138			IV	0,40001	0,6	0,40001	0,6	0,40001	0,6			
7										V	0,60001	0,8	0,60001	0,8	0,60001	0,8			
8										VI	0,80001	1	0,80001	1	0,80001	1			
9		CPT des Knotens MTPM																	
10		Zustandskombination																	
11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
12	MTTF	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	
13	MTR	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
14	I. Dauerverfügbarkeit min	0	0	0	0	0	0,00002	7E-05	3,522E-05	1	0,75	0,5	0,3457157	1	0,85714	0,66667	0,5138		
15	I. Dauerverfügbarkeit max	0	0	0	0	0	0,99999	0,75	0,5	1	0,999966668	0,857142857	0,6666667	1	0,99999	0,91667	0,7856		
16	Zustand der inneren Dauerverfügbarkeit	I	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17		II	0,00001	0,2	0	0	0	0,1511111	0,2667	0,4000082	0	0	0	0	0	0	0	0	
18		III	0,20001	0,4	0	0	0	0,2	0,2667	0,4000082	0	0	0	0,1691359	0	0	0	0	
19		IV	0,40001	0,6	0	0	0	0,2	0,2667	0,1999941	0	0	0,28	0,6231169	0	0	0	0,31714	
20		V	0,60001	0,8	0	0	0	0,2	0,2	0	0	0,200026669	0,599972	0,2076849	0	0	0,53344	0,68282	
21		VI	0,80001	1	0	0	0	1	0,2	0	0	1	0,799933325	0,169972	0	1	1,00013	0,46652	0
22																			

Abbildung 66: Berechnung der Zelleneinträge der CPT

Die Bereiche A bis E der CPT-Formel aus Abbildung 66 werden in der folgenden Abbildung erläutert:

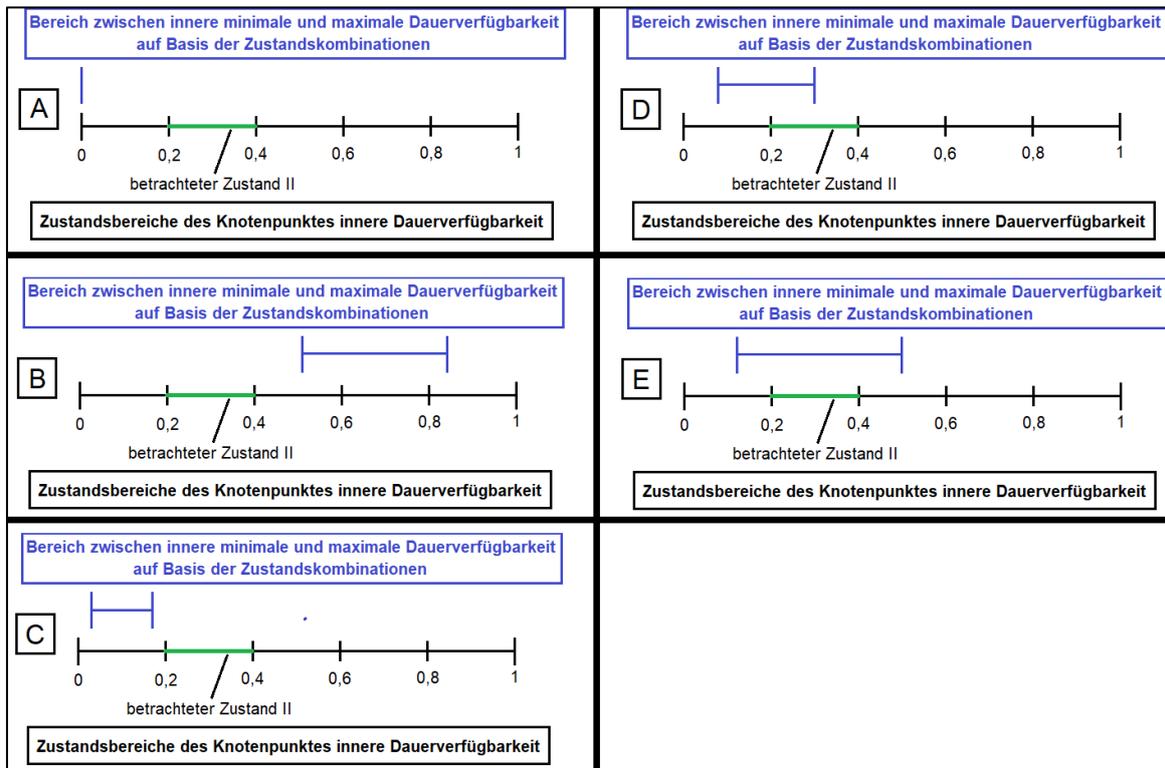


Abbildung 67: Erklärung der Berechnungsformel für die CPT-Zellen

Die rechte Seite der Tabelle 51 enthält die transponierte CPT (farbig hinterlegte Zellen). Während die verschiedenen Zeilen die Zustandskombinationen darstellen, bezeichnen die Spalten die Zustände des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit.

	MTTF	MTTR	I. Dauerverfügbarkeit min	I. Dauerverfügbarkeit max	Zustand der inneren Dauerverfügbarkeit						
					I	II	III	IV	V	VI	
					0	0,00001 - 0,2	0,20001 - 0,4	0,40001 - 0,6	0,60001 - 0,8	0,80001 - 1	
Zustandskombination	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	2	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0
	3	1	3	0	0	1	0	0	0	0	0
	4	1	4	0	0	1	0	0	0	0	0
	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	1
	6	2	2	0,0002	0,9999	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	7	2	3	6,7E-05	0,75	0	0,2666	0,2666	0,2666	0,1999	0
	8	2	4	3,5E-05	0,5	0	0,4	0,4	0,2	0	0
	9	3	1	1	1	0	0	0	0	0	1
	10	3	2	0,75	1	0	0	0	0	0,2000	0,7996
	11	3	3	0,5	0,8571	0	0	0	0,28	0,5597	0,1597
	12	3	4	0,34572	0,6667	0	0	0,1691	0,6228	0,2074	0
	13	4	1	1	1	0	0	0	0	0	1
	14	4	2	0,85714	1	0	0	0	0	0	1,0001
	15	4	3	0,66667	0,9166	0	0	0	0	0,5334	0,4662
	16	4	4	0,5138	0,7856	0	0	0	0,3171	0,6825	0

**Tabelle 51: Min. und max. innere Dauerverfügbarkeit und die transponierte CPT**

Die berechneten Werte der CPT werden in die CPT des Knotenpunktes innere Dauer-  
verfügbarkeit eingetragen (siehe 3.3.4.2 Befüllung einer CPT). Das Programm GeNle  
SMILE berechnet mit Hilfe der Verteilungsfunktion des BN (Formel 28) automatisch  
die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des Knotenpunktes. Um diesen Vorgang nach-  
vollziehen zu können, wird die im Programm hinterlegte Berechnung in weiterer Folge  
erläutert.

Für die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des Knotenpunktes innere Dauerverfüg-  
barkeit (P[Zustand des inneren Dauerverfügbarkeitsknotens]) wird die Wahrscheinlich-  
keit für den Auftritt der einzelnen Zustandskombinationen benötigt (P[Zustandskombi-  
nation]). Die Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten für ihre jeweiligen Zustände sind  
in Tabelle 31 und Tabelle 34 gegeben. P[Zustandskombination] berechnet sich aus  
dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten für ihre betrachteten Zu-  
stände.

VERWEIS =VERWEIS(G27;SB\$26:SE\$26;SB\$27:SE\$27)\*VERWEIS(G28;SB\$26:SE\$26;SB\$28:SE\$28)

Suchkriterium
Suchvektor
Ergebnisvektor
Betrachtete Zelle

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
25		P[I]	P[II]	P[III]	P[IV]								Zustandskombination			
26		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	MTTF	5E-06	0,1849	0,813	0,002	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
28	MTTR	0,13	0,0147	0,119	0,737	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
29	P[Zustandskombination]					7E-07	6E-07	4E-06	0,024	0,0027248	0,021927004	0,136247704	0,105649257	0,0119767	0,096378055	

**Abbildung 68: Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustandskombinationen**

		MTTF	MTTR	P[Zustandskombination]
P[I]	1	5E-06	0,13	
P[II]	2	0,1849	0,015	
P[III]	3	0,8129	0,119	
P[IV]	4	0,0022	0,737	
Zustandskombination	1	1	1	6,8E-07
	2	1	2	7,8E-08
	3	1	3	6,2E-07
	4	1	4	3,9E-06
	5	2	1	0,02404
	6	2	2	0,00272
	7	2	3	0,02193
	8	2	4	0,13625
	9	3	1	0,10565
	10	3	2	0,01198
	11	3	3	0,09638
	12	3	4	0,59886
	13	4	1	0,00028
	14	4	2	3,2E-05
	15	4	3	0,00026
	16	4	4	0,00161

**Tabelle 52: Zustandskombinationen der inneren Dauerverfügbarkeit**

Die Zellen der CPT des betrachteten Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit werden mit den zugehörigen Werten der P[Zustandskombination] multipliziert. Dadurch erhält man die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit für eine betrachtete Zustandskombination (P[Zustand des Dauerv | Zustandskombination]).

	P[Zustandskombination]	Zustand des Dauerverfügbarkeitsknotens						P[Zustand des Dauerv   Zustandskombination]							
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI		
Zustandskombination	1	6,84E-07	1	0	0	0	0	0	6,8E-07	0	0	0	0	0	0
	2	7,75E-08	1	0	0	0	0	0	7,8E-08	0	0	0	0	0	0
	3	6,24E-07	1	0	0	0	0	0	6,2E-07	0	0	0	0	0	0
	4	3,88E-06	1	0	0	0	0	0	3,9E-06	0	0	0	0	0	0
	5	0,024036	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,02404	
	6	0,002725	0	0,19985	0,20004	0,20004	0,20004	0,19998	0	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055
	7	0,021927	0	0,26668	0,26668	0,26668	0,20000	0	0	0,00585	0,00585	0,00585	0,00439	0	0
	8	0,136248	0	0,40001	0,40001	0,19999	0	0	0	0,0545	0,0545	0,02725	0	0	0
	9	0,105649	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,10565
	10	0,011977	0	0	0	0	0,20003	0,79993	0	0	0	0	0,0024	0,00958	0
	11	0,096378	0	0	0	0,28	0,55997	0,15997	0	0	0	0,02699	0,05397	0,01542	0
	12	0,598864	0	0	0,16914	0,62312	0,20769	0	0	0	0,10129	0,37316	0,12438	0	0
	13	0,000285	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,00029	0
	14	3,23E-05	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3,2E-05	0
	15	0,00026	0	0	0	0	0,53344	0,46651	0	0	0	0	0,00014	0,00012	0
	16	0,001614	0	0	0	0,31714	0,68282	0	0	0	0	0,00051	0,00110	0	0
<b>P[Zustand des inneren Dauerverfügbarkeitsknotens]</b>		<b>5E-06</b>	<b>0,0609</b>	<b>0,1622</b>	<b>0,4343</b>	<b>0,1869</b>	<b>0,1557</b>								

**Tabelle 53: Zustandswahrscheinlichkeiten der inneren Dauerverfügbarkeit**

Durch spaltenweise Addition der P[Zustand des Dauerv | Zustandskombination] wird die Wahrscheinlichkeit der Zustände des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit (P[Zustand des inneren Dauerverfügbarkeitsknotens]) berechnet. Diese finden sich als Balkendiagramm und Prozentzahlen im Knotenpunkt innere Dauerverfügbarkeit des BN (siehe Abbildung 72) wieder.

### 3.3.7.2 Operative Dauerverfügbarkeit

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes operative Dauerverfügbarkeit zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um drei Elternknoten mit je vier möglichen Zuständen. Die Spaltenanzahl errechnet sich somit wie folgt:

$Spaltenanzahl\ der\ operativen\ Dauerverfügbarkeit-CPT = 4 * 4 * 4 = 64$

**Formel 35: Berechnung der Spaltenanzahl der op. Dauerverfügbarkeit-CPT**

Um die CPT des Knotenpunktes operative Dauerverfügbarkeit befüllen zu können, werden die minimale und maximale operative Dauerverfügbarkeit für jede Zustandskombination der Elternknoten berechnet. Zur Berechnung der minimalen operativen Dauerverfügbarkeit einer Zustandskombination wird der minimale Wert der MTTF und der maximale Wert der MTTR bzw. MTTPM an Formel 23 angewandt. Setzt man in diese Formel den maximalen Wert der MTTF und den minimalen Wert der MTTR bzw. MTTPM ein, so erhält man die maximale operative Dauerverfügbarkeit der Zustandskombination.

=WENN((VERWEIS(D52;\$A\$3:\$A\$6;\$G\$3:\$G\$6)+VERWEIS(D53;\$A\$3:\$A\$6;\$E\$3:\$E\$6)+VERWEIS(D54;\$A\$3:\$A\$6;\$B\$3:\$B\$6))>0;  
 VERWEIS(D54;\$A\$3:\$A\$6;\$B\$3:\$B\$6)/(VERWEIS(D54;\$A\$3:\$A\$6;\$B\$3:\$B\$6)+VERWEIS(D53;\$A\$3:\$A\$6;\$E\$3:\$E\$6)+VERWEIS(D52;\$A\$3:\$A\$6;\$G\$3:\$G\$6));0)

Suchkriterium
Suchvektor
Ergebnisvektor

Wahrheitstest

Wert wenn wahr
Wert wenn falsch

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1																							
2	Zustand	min	max	min	max	min	max			Zustand	I. Dauerverfügbarkeit	O. Dauerverfügbarkeit	Instandhaltbarkeit										
3	1	0	0	0	0	0	0			I	0	0	0	0	0	0							
4	2	1E-04	1,5	1E-04	0,5	1E-04	0,5			II	0,00001	0,2	0,00001	0,2	0,00001	0,2							
5	3	1,5	3	0,5	1,5	0,5	1,5			III	0,20001	0,4	0,20001	0,4	0,20001	0,4							
6	4	3	5,4963	1,5	2,839	1,5	2,138			IV	0,40001	0,6	0,40001	0,6	0,40001	0,6							
7										V	0,60001	0,8	0,60001	0,8	0,60001	0,8							
8										VI	0,80001	1	0,80001	1	0,80001	1							
9																							
10																							
50																							
51																							
52	MTTPM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	MTTR	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1
54	MTTF	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
55	O. Dauerverfügbarkeit min	=WENN	1	1	1	0	2E-04	0,75	0,85714	0	6,66622E-05	0,5	0,66667	0	4E-05	0,3457	0,5138	0	0,0002	0,75	0,8571428		
56	O. Dauerverfügbarkeit max	0	1	1	1	0	1	1	0,99998	0	0,75	0,857142857	0,91661	0	0,5	0,66667	0,7856	0	0,9999	0,999966668	0,9999813		

**Abbildung 69: Berechnung der operativen Dauerverfügbarkeit**

Die weitere Vorgehensweise bei der Berechnung ist identisch mit jener bei der Berechnung des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit (siehe Kapitel 3.3.7.1). Daher werden lediglich die Ergebnisse in tabellarischer Form präsentiert:

	MTTPM	MTTR	MTTF	O. Dauer- verfügbar- keit min	O. Dauer- verfügbar- keit max	Zustand der operativen Dauerverfügbarkeit					
						I	II	III	IV	V	VI
						0	0,00001 - 0,2	0,20001 - 0,4	0,40001 - 0,6	0,60001 - 0,8	0,80001 - 1
1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	1
3	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0	1
4	1	1	4	1	1	0	0	0	0	0	1
5	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
6	1	2	2	0,0002	0,9999	0	0,1999	0,2	0,2	0,2	0,1999
7	1	2	3	0,75	1	0	0	0	0	0,2	0,7996
8	1	2	4	0,8571	1	0	0	0	0	0	1,0001
9	1	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
10	1	3	2	7E-05	0,75	0	0,2666	0,2666	0,2666	0,1999	0
11	1	3	3	0,5	0,8571	0	0	0	0,28	0,5597	0,1597
12	1	3	4	0,6667	0,9166	0	0	0	0	0,5334	0,4662
13	1	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0
14	1	4	2	4E-05	0,5	0	0,4	0,3998	0,1998	0	0
15	1	4	3	0,3457	0,6667	0	0	0,1691	0,6228	0,2074	0
16	1	4	4	0,5138	0,7856	0	0	0	0,3171	0,6825	0
17	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
18	2	1	2	0,0002	0,9999	0	0,1999	0,2	0,2	0,2	0,1999
19	2	1	3	0,75	1	0	0	0	0	0,2	0,7996
20	2	1	4	0,8571	1	0	0	0	0	0	1,0001
21	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
22	2	2	2	1E-04	0,9999	0	0,1999	0,1999	0,1999	0,1999	0,1998
23	2	2	3	0,6	0,9999	0	0	0	0	0,4998	0,4997
24	2	2	4	0,75	1	0	0	0	0	0,2	0,7996
25	2	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
26	2	3	2	5E-05	0,75	0	0,2666	0,2666	0,2666	0,1998	0
27	2	3	3	0,4286	0,8571	0	0	0	0,4	0,4665	0,1331
28	2	3	4	0,6	0,9166	0	0	0	0	0,6314	0,368
29	2	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0
30	2	4	2	3E-05	0,5	0	0,4	0,3998	0,1998	0	0
31	2	4	3	0,31	0,6667	0	0	0,2524	0,5605	0,1866	0
32	2	4	4	0,4733	0,7856	0	0	0	0,4058	0,5939	0
33	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
34	3	1	2	7E-05	0,75	0	0,2666	0,2666	0,2666	0,1999	0
35	3	1	3	0,5	0,8571	0	0	0	0,28	0,5597	0,1597
36	3	1	4	0,6667	0,9166	0	0	0	0	0,5334	0,4662
37	3	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
38	3	2	2	5E-05	0,75	0	0,2666	0,2666	0,2666	0,1998	0
39	3	2	3	0,4286	0,8571	0	0	0	0,4	0,4665	0,1331
40	3	2	4	0,6	0,9166	0	0	0	0	0,6314	0,368
41	3	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
42	3	3	2	3E-05	0,6	0	0,3333	0,3332	0,3332	0	0
43	3	3	3	0,3333	0,75	0	0	0,16	0,4798	0,3598	0
44	3	3	4	0,5	0,8461	0	0	0	0,289	0,5776	0,1328
45	3	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0
46	3	4	2	2E-05	0,4286	0	0,4666	0,4665	0,0664	0	0
47	3	4	3	0,2569	0,6	0	0	0,4171	0,5826	0	0
48	3	4	4	0,4088	0,7332	0	0	0	0,5894	0,4103	0
49	4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
50	4	1	2	5E-05	0,5	0	0,3999	0,3998	0,1998	0	0
51	4	1	3	0,4123	0,6667	0	0	0	0,7379	0,2617	0
52	4	1	4	0,5839	0,7856	0	0	0	0,0797	0,9198	0
53	4	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
54	4	2	2	4E-05	0,5	0	0,4	0,3998	0,1998	0	0
55	4	2	3	0,3625	0,6667	0	0	0,1232	0,6573	0,2188	0
56	4	2	4	0,5321	0,7856	0	0	0	0,2678	0,7318	0
57	4	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
58	4	3	2	3E-05	0,4286	0	0,4666	0,4665	0,0664	0	0
59	4	3	3	0,292	0,6	0	0	0,3507	0,6489	0	0
60	4	3	4	0,452	0,7332	0	0	0	0,5264	0,4733	0
61	4	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0
62	4	4	2	2E-05	0,3333	0	0,6	0,3997	0	0	0
63	4	4	3	0,2316	0,5	0	0	0,6274	0,3722	0	0
64	4	4	4	0,3761	0,6469	0	0	0,0882	0,7382	0,1728	0

Tabelle 54: Min. und max. op. Dauerverfügbarkeit und die transponierte CPT

Kategorie	MTTPM	MTRR	MTTF	P[Zustandskombination]	
P[I]	1	0,9052	0,13		5E-06
P[II]	2	0,0848	0,015		0,185
P[III]	3	0,0027	0,119		0,813
P[IV]	4	0,0073	0,737		0,002
Zustandskombination	1	1	1	1	6,2E-07
	2	1	1	2	0,02176
	3	1	1	3	0,09563
	4	1	1	4	0,00026
	5	1	2	1	7E-08
	6	1	2	2	0,00247
	7	1	2	3	0,01084
	8	1	2	4	2,9E-05
	9	1	3	1	5,6E-07
	10	1	3	2	0,01985
	11	1	3	3	0,08724
	12	1	3	4	0,00024
	13	1	4	1	3,5E-06
	14	1	4	2	0,12333
	15	1	4	3	0,54208
	16	1	4	4	0,00146
	17	2	1	1	5,8E-08
	18	2	1	2	0,00204
	19	2	1	3	0,00896
	20	2	1	4	2,4E-05
	21	2	2	1	6,6E-09
	22	2	2	2	0,00023
	23	2	2	3	0,00102
	24	2	2	4	2,7E-06
	25	2	3	1	5,3E-08
	26	2	3	2	0,00186
	27	2	3	3	0,00818
	28	2	3	4	2,2E-05
	29	2	4	1	3,3E-07
	30	2	4	2	0,01156
	31	2	4	3	0,0508
	32	2	4	4	0,00014
	33	3	1	1	1,8E-09
	34	3	1	2	6,4E-05
	35	3	1	3	0,00028
	36	3	1	4	7,6E-07
	37	3	2	1	2,1E-10
	38	3	2	2	7,3E-06
	39	3	2	3	3,2E-05
	40	3	2	4	8,6E-08
	41	3	3	1	1,7E-09
	42	3	3	2	5,9E-05
	43	3	3	3	0,00026
	44	3	3	4	6,9E-07
	45	3	4	1	1E-08
	46	3	4	2	0,00036
	47	3	4	3	0,0016
	48	3	4	4	4,3E-06
	49	4	1	1	5E-09
	50	4	1	2	0,00018
	51	4	1	3	0,00077
	52	4	1	4	2,1E-06
	53	4	2	1	5,7E-10
	54	4	2	2	2E-05
	55	4	2	3	8,8E-05
	56	4	2	4	2,4E-07
	57	4	3	1	4,6E-09
	58	4	3	2	0,00016
	59	4	3	3	0,00071
	60	4	3	4	1,9E-06
	61	4	4	1	2,8E-08
	62	4	4	2	0,001
	63	4	4	3	0,00439
	64	4	4	4	1,2E-05

Tabelle 55: Zustandskombinationen der operativen Dauerverfügbarkeit

	P[Zustandskombination]	Zustand des Dauerverfügbarkeitsknotens						P[Zustand des Dauerv] Zustandskombination]						
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	
1	6,19E-07	1	0	0	0	0	0	6,2E-07	0	0	0	0	0	0
2	0,021757	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,02176
3	0,095631	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,09563
4	0,000258	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00026
5	7,02E-08	1	0	0	0	0	0	7E-08	0	0	0	0	0	0
6	0,002466	0	0,19985	0,19995	0,19995	0,19995	0,19989	0	0,00049	0,00049	0,00049	0,00049	0,00049	0,00049
7	0,010841	0	0	0	0	0,20003	0,79957	0	0	0	0	0,00217	0,00867	0
8	2,92E-05	0	0	0	0	0	1,00013	0	0	0	0	0	0	2,9E-05
9	5,65E-07	1	0	0	0	0	0	5,6E-07	0	0	0	0	0	0
10	0,019848	0	0,2666	0,26656	0,26656	0,19988	0	0	0,00529	0,00529	0,00529	0,00397	0,00867	0
11	0,087239	0	0	0	0,28	0,55972	0,15972	0	0	0	0,02443	0,04883	0,01393	0
12	0,000235	0	0	0	0	0,53344	0,46616	0	0	0	0	0,00013	0,00011	0
13	3,51E-06	1	0	0	0	0	0	3,5E-06	0	0	0	0	0	0
14	0,123328	0	0,39996	0,39983	0,19981	0	0	0	0,04933	0,04931	0,02464	0	0	0
15	0,542076	0	0	0,16914	0,62284	0,2074	0	0	0	0,09168	0,33762	0,11243	0	0
16	0,001461	0	0	0	0,31714	0,68249	0	0	0	0	0,00046	0,001	0	0
17	5,8E-08	1	0	0	0	0	0	5,8E-08	0	0	0	0	0	0
18	0,002039	0	0,19985	0,19995	0,19995	0,19995	0,19989	0	0,00041	0,00041	0,00041	0,00041	0,00041	0,00041
19	0,008961	0	0	0	0	0,20003	0,79957	0	0	0	0	0,00179	0,00717	0
20	2,42E-05	0	0	0	0	0	1,00013	0	0	0	0	0	0	2,4E-05
21	6,57E-09	1	0	0	0	0	0	6,6E-09	0	0	0	0	0	0
22	0,000231	0	0,19995	0,19995	0,19995	0,19995	0,19981	0	4,6E-05	4,6E-05	4,6E-05	4,6E-05	4,6E-05	4,6E-05
23	0,001016	0	0	0	0	0,49983	0,49967	0	0	0	0	0,00051	0,00051	0
24	2,74E-06	0	0	0	0	0,20003	0,79957	0	0	0	0	5,5E-07	2,2E-06	0
25	5,29E-08	1	0	0	0	0	0	5,3E-08	0	0	0	0	0	0
26	0,00186	0	0,26663	0,26656	0,26656	0,19984	0	0	0,0005	0,0005	0,0005	0,00037	0,00867	0
27	0,008175	0	0	0	0,40002	0,46646	0,13305	0	0	0	0,00327	0,00381	0,00109	0
28	2,2E-05	0	0	0	0	0,6314	0,36797	0	0	0	0	1,4E-05	8,1E-06	0
29	3,29E-07	1	0	0	0	0	0	3,3E-07	0	0	0	0	0	0
30	0,011557	0	0,39998	0,39984	0,19979	0	0	0	0,00462	0,00462	0,00231	0	0	0
31	0,050797	0	0	0,25236	0,56048	0,1866	0	0	0	0,01282	0,02847	0,00948	0	0
32	0,000137	0	0	0	0,40576	0,59392	0	0	0	0	5,6E-05	8,1E-05	0	0
33	1,83E-09	1	0	0	0	0	0	1,8E-09	0	0	0	0	0	0
34	6,43E-05	0	0,2666	0,26656	0,26656	0,19988	0	0	1,7E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,3E-05	0	0
35	0,000283	0	0	0	0,28	0,55972	0,15972	0	0	0	7,9E-05	0,00016	4,5E-05	0
36	7,62E-07	0	0	0	0	0,53344	0,46616	0	0	0	0	4,1E-07	3,5E-07	0
37	2,07E-10	1	0	0	0	0	0	2,1E-10	0	0	0	0	0	0
38	7,29E-06	0	0,26663	0,26656	0,26656	0,19984	0	0	1,9E-06	1,9E-06	1,9E-06	1,5E-06	0	0
39	3,2E-05	0	0	0	0,40002	0,46646	0,13305	0	0	0	1,3E-05	1,5E-05	4,3E-06	0
40	8,63E-08	0	0	0	0	0,6314	0,36797	0	0	0	0	5,5E-08	3,2E-08	0
41	1,67E-09	1	0	0	0	0	0	1,7E-09	0	0	0	0	0	0
42	5,86E-05	0	0,3333	0,33319	0,33319	0	0	0	2E-05	2E-05	2E-05	0	0	0
43	0,000258	0	0	0,16	0,47976	0,35976	0	0	0	4,1E-05	0,00012	9,3E-05	0	0
44	6,95E-07	0	0	0	0,28896	0,57764	0,13282	0	0	0	2E-07	4E-07	9,2E-08	0
45	1,04E-08	1	0	0	0	0	0	1E-08	0	0	0	0	0	0
46	0,000364	0	0,46664	0,46646	0,06644	0	0	0	0,00017	0,00017	2,4E-05	0	0	0
47	0,001601	0	0	0,41708	0,58263	0	0	0	0	0,00067	0,00093	0	0	0
48	4,32E-06	0	0	0	0,58941	0,41028	0	0	0	0	2,5E-06	1,8E-06	0	0
49	5,01E-09	1	0	0	0	0	0	5E-09	0	0	0	0	0	0
50	0,000176	0	0,39994	0,39984	0,19982	0	0	0	7E-05	7E-05	3,5E-05	0	0	0
51	0,000774	0	0	0	0,73786	0,26174	0	0	0	0	0,00057	0,0002	0	0
52	2,09E-06	0	0	0	0,07975	0,91976	0	0	0	0	1,7E-07	1,9E-06	0	0
53	5,68E-10	1	0	0	0	0	0	5,7E-10	0	0	0	0	0	0
54	2E-05	0	0,39997	0,39984	0,19979	0	0	0	8E-06	8E-06	4E-06	0	0	0
55	8,78E-05	0	0	0,12324	0,65728	0,21882	0	0	0	1,1E-05	5,8E-05	1,9E-05	0	0
56	2,37E-07	0	0	0	0,26777	0,73183	0	0	0	0	6,3E-08	1,7E-07	0	0
57	4,57E-09	1	0	0	0	0	0	4,6E-09	0	0	0	0	0	0
58	0,000161	0	0,46663	0,46646	0,06644	0	0	0	7,5E-05	7,5E-05	1,1E-05	0	0	0
59	0,000706	0	0	0,35074	0,64894	0	0	0	0	0,00025	0,00046	0	0	0
60	1,9E-06	0	0	0	0,52638	0,47327	0	0	0	0	1E-06	9E-07	0	0
61	2,84E-08	1	0	0	0	0	0	2,8E-08	0	0	0	0	0	0
62	0,000999	0	0,59998	0,39972	0	0	0	0	0,0006	0,0004	0	0	0	0
63	0,004389	0	0	0,62741	0,37221	0	0	0	0	0,00275	0,00163	0	0	0
64	1,18E-05	0	0	0,08825	0,73818	0,17284	0	0	0	1E-06	8,7E-06	2E-06	0	0
<b>P[Zustand des operativen Dauerverfügbarkeitsknotens]</b>								<b>5E-06</b>	<b>0,062</b>	<b>0,17</b>	<b>0,432</b>	<b>0,186</b>	<b>0,15</b>	

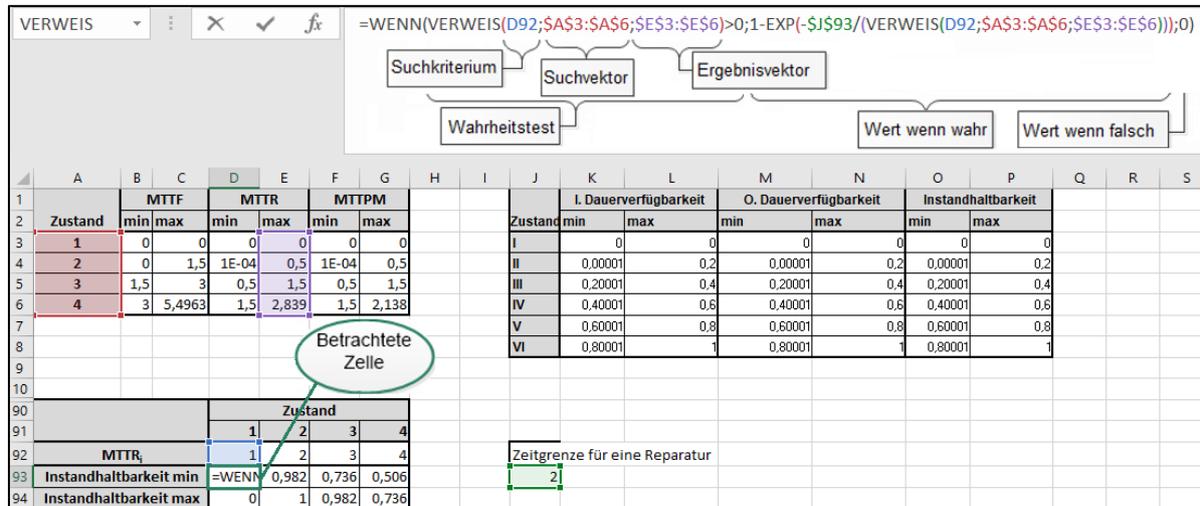
Tabelle 56: Zustandswahrscheinlichkeit der operativen Dauerverfügbarkeit

### 3.3.7.3 Instandhaltbarkeit

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes Instandhaltbarkeit zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um einen Elternknoten mit vier möglichen Zuständen, womit die Spaltenanzahl der CPT ebenfalls vier ist.

Um die CPT des Knotenpunktes Instandhaltbarkeit befüllen zu können, werden die minimale und maximale Instandhaltbarkeit für die Zustände des Elternknoten berechnet. Zur Berechnung der minimalen Instandhaltbarkeit der Zustände wird der maximale

Wert der MTTR an Formel 19 angewandt. Setzt man in diese Formel den minimalen Wert der MTTR ein, so erhält man die maximale Instandhaltbarkeit der Zustände.



**Abbildung 70: Berechnung der Instandhaltbarkeit der Zustände des Elternknoten**

Die weitere Vorgehensweise bei der Berechnung ist identisch mit jener bei der Berechnung des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit (siehe Kapitel 3.3.7.1). Daher werden lediglich die Ergebnisse in tabellarischer Form präsentiert:

	MTTR <sub>i</sub>	Instandhaltbarkeit min	Instandhaltbarkeit max	Zustand der Instandhaltbarkeit					
				I	II	III	IV	V	VI
				0	0,00001 -0,2	0,20001 -0,4	0,40001 -0,6	0,60001 -0,8	0,80001 -1
Zustand	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	2	2	0,9817	1	0	0	0	0	1
	3	3	0,7364	0,98168	0	0	0	0,2593	0,7403
	4	4	0,5057	0,7364	0	0	0,4089	0,5907	0

**Tabelle 57: Min. und max. Instandhaltbarkeit und die transponierte CPT**

	P[Zustand]	Zustand des Instandhaltungsknotens						P[Zustand des Instand   Zustandskombination]						
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	
P[I]	1	0,13	1	0	0	0	0	0,12997	0	0	0	0	0	0
P[II]	2	0,0147	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,01473	
P[III]	3	0,1186	0	0	0	0,259	0,74	0	0	0	0	0,03074	0,08778	
P[IV]	4	0,7367	0	0	0	0,409	0,591	0	0	0	0,30123	0,43518	0	
<b>P[Zustand des Instandhaltungsknotens]</b>			<b>0,13</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,301</b>	<b>0,466</b>	<b>0,103</b>						

**Tabelle 58: Zustandswahrscheinlichkeit der Instandhaltbarkeit**

### 3.3.7.4 Gesamtanlageneffizienz OEE

Es gilt die Zellen der CPT des Knotenpunktes OEE zu befüllen. Die Spaltenanzahl der Matrix ist dabei durch die Anzahl der möglichen Zustandskombinationen der Elternknoten gegeben. Es handelt sich um drei Elternknoten mit je vier möglichen Zuständen. Die Spaltenanzahl hat somit erneut den Wert 64.

Um die CPT des Knotenpunktes OEE befüllen zu können, werden die minimale und maximale OEE für jede Zustandskombination der Elternknoten berechnet. Zur Berechnung der minimalen OEE einer Zustandskombination wird der minimale Wert des Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad an Formel 27 angewandt. Setzt man in diese

Formel den maximalen Wert des Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad ein, so erhält man die maximale OEE der Zustandskombination.

Die weitere Vorgehensweise bei der Berechnung ist identisch mit jener bei der Berechnung des Knotenpunktes innere Dauerverfügbarkeit (siehe Kapitel 3.3.7.1). Daher werden lediglich die Ergebnisse in tabellarischer Form präsentiert:

	Nutzungs-grad	Leistungs-grad	Qualitäts-grad	OEE min	OEE max	Zustand des OEE					
						I	II	III	IV	V	VI
						0	0,00001 - 0,2	0,20001 - 0,4	0,40001 - 0,6	0,60001 - 0,8	0,80001 - 1
1	1	1	1	0	0,1617	0	0,9999	0	0	0	0
2	1	1	2	0	0,3234	0	0,6184	0,3815	0	0	0
3	1	1	3	0	0,49	0	0,4081	0,4081	0,1836	0	0
4	1	1	4	0	0,49	0	0,4081	0,4081	0,1837	0	0
5	1	2	1	0	0,16335	0	0,9999	0	0	0	0
6	1	2	2	0	0,3267	0	0,6122	0,3878	0	0	0
7	1	2	3	0	0,495	0	0,404	0,404	0,1919	0	0
8	1	2	4	0	0,495	0	0,404	0,404	0,1919	0	0
9	1	3	1	0	0,16418	0	0,9999	0	0	0	0
10	1	3	2	0	0,32835	0	0,6091	0,3909	0	0	0
11	1	3	3	0	0,4975	0	0,402	0,402	0,196	0	0
12	1	3	4	0	0,4975	0	0,402	0,402	0,196	0	0
13	1	4	1	0	0,165	0	0,9999	0	0	0	0
14	1	4	2	0	0,33	0	0,606	0,3939	0	0	0
15	1	4	3	0	0,5	0	0,4	0,4	0,2	0	0
16	1	4	4	0	0,5	0	0,4	0,4	0,2	0	0
17	2	1	1	0	0,22638	0	0,8834	0,1165	0	0	0
18	2	1	2	0	0,45276	0	0,4417	0,4417	0,1165	0	0
19	2	1	3	0	0,68599	0	0,2915	0,2915	0,2915	0,12534	0
20	2	1	4	0	0,686	0	0,2915	0,2915	0,2915	0,12535	0
21	2	2	1	0	0,22869	0	0,8745	0,1254	0	0	0
22	2	2	2	0	0,16171	0,45738	0	0,1295	0,6764	0,194	0
23	2	2	3	0	0,32341	0,69299	0	0	0,2072	0,5411	0,25159
24	2	2	4	0	0,49001	0,693	0	0	0	0,5418	0,45811
25	2	3	1	0	0,22985	0	0,8701	0,1298	0	0	0
26	2	3	2	0	0,16336	0,45969	0	0,1236	0,6749	0,2014	0
27	2	3	3	0	0,32671	0,69649	0	0	0,1982	0,5408	0,26092
28	2	3	4	0	0,49501	0,6965	0	0	0	0,5211	0,47889
29	2	4	1	0	0,231	0	0,8658	0,1342	0	0	0
30	2	4	2	0	0,16418	0,462	0	0,1203	0,6715	0,2081	0
31	2	4	3	0	0,32836	0,69999	0	0	0,1928	0,5381	0,26904
32	2	4	4	0	0,49752	0,7	0	0	0	0,5061	0,49381
33	3	1	1	0	0,29106	0	0,6871	0,3128	0	0	0
34	3	1	2	0	0,58212	0	0,3436	0,3436	0,3128	0	0
35	3	1	3	0	0,88199	0	0,2267	0,2267	0,2267	0,22675	0,093
36	3	1	4	0	0,882	0	0,2267	0,2267	0,2267	0,22675	0,093
37	3	2	1	0	0,29403	0	0,6802	0,3198	0	0	0
38	3	2	2	0	0,22639	0,58806	0	0	0,48	0,52	0
39	3	2	3	0	0,45278	0,89099	0	0	0	0,336	0,45638
40	3	2	4	0	0,68602	0,891	0	0	0	0	0,55606
41	3	3	1	0	0,29552	0	0,6768	0,3232	0	0	0
42	3	3	2	0	0,22870	0,59103	0	0	0,4728	0,5272	0
43	3	3	3	0	0,4574	0,89549	0	0	0	0,3255	0,4565
44	3	3	4	0	0,69302	0,8955	0	0	0	0	0,52836
45	3	4	1	0	0,297	0	0,6734	0,3266	0	0	0
46	3	4	2	0	0,22986	0,594	0	0	0,4672	0,5327	0
47	3	4	3	0	0,45971	0,89999	0	0	0	0,3186	0,45423
48	3	4	4	0	0,69652	0,9	0	0	0	0	0,50856
49	4	1	1	0	0,3234	0	0,6184	0,3815	0	0	0
50	4	1	2	0	0,6468	0	0,3092	0,3092	0,3092	0,07234	0
51	4	1	3	0	0,97999	0	0,2041	0,2041	0,2041	0,20407	0,1837
52	4	1	4	0	0,98	0	0,2041	0,2041	0,2041	0,20407	0,1837
53	4	2	1	0	0,3267	0	0,6122	0,3878	0	0	0
54	4	2	2	0	0,29108	0,6534	0	0	0,3006	0,552	0,14735
55	4	2	3	0	0,58214	0,98999	0	0	0	0,0438	0,49035
56	4	2	4	0	0,88202	0,99	0	0	0	0	0,10926
57	4	3	1	0	0,32835	0	0,6091	0,3909	0	0	0
58	4	3	2	0	0,29405	0,6567	0	0	0,2922	0,5515	0,15632
59	4	3	3	0	0,58808	0,99499	0	0	0	0,0293	0,49149
60	4	3	4	0	0,89102	0,995	0	0	0	0	0,10481
61	4	4	1	0	0,33	0	0,606	0,3939	0	0	0
62	4	4	2	0	0,29553	0,66	0	0	0,2866	0,5487	0,1646
63	4	4	3	0	0,59105	0,99999	0	0	0	0,0219	0,48905
64	4	4	4	0	0,89552	1	0	0	0	0	0,489

Tabelle 59: Min. und max. OEE und die transponierte CPT

Kategorie	Nutzungsgrad	Leistungsgrad	Qualitätsgrad		
P[I]	1	0,5845	0,0000	0	
P[II]	2	0,2144	0,0060	0	
P[III]	3	0,0526	0,0375	0	
P[IV]	4	0,1485	0,9565	1	
Zustandskombination	1	1	1	1	0
	2	1	1	2	0
	3	1	1	3	0
	4	1	1	4	0
	5	1	2	1	0
	6	1	2	2	0
	7	1	2	3	0
	8	1	2	4	0,003515
	9	1	3	1	0
	10	1	3	2	0
	11	1	3	3	0
	12	1	3	4	0,02193
	13	1	4	1	0
	14	1	4	2	0
	15	1	4	3	0
	16	1	4	4	0,559023
	17	2	1	1	0
	18	2	1	2	0
	19	2	1	3	0
	20	2	1	4	0
	21	2	2	1	0
	22	2	2	2	0
	23	2	2	3	0
	24	2	2	4	0,001289
	25	2	3	1	0
	26	2	3	2	0
	27	2	3	3	0
	28	2	3	4	0,008043
	29	2	4	1	0
	30	2	4	2	0
	31	2	4	3	0
	32	2	4	4	0,205022
	33	3	1	1	0
	34	3	1	2	0
	35	3	1	3	0
	36	3	1	4	0
	37	3	2	1	0
	38	3	2	2	0
	39	3	2	3	0
	40	3	2	4	0,000317
	41	3	3	1	0
	42	3	3	2	0
	43	3	3	3	0
	44	3	3	4	0,001975
	45	3	4	1	0
	46	3	4	2	0
	47	3	4	3	0
	48	3	4	4	0,050356
	49	4	1	1	0
	50	4	1	2	0
	51	4	1	3	0
	52	4	1	4	0
	53	4	2	1	0
	54	4	2	2	0
	55	4	2	3	0
	56	4	2	4	0,000893
	57	4	3	1	0
	58	4	3	2	0
	59	4	3	3	0
	60	4	3	4	0,005573
	61	4	4	1	0
	62	4	4	2	0
	63	4	4	3	0
	64	4	4	4	0,142065

Tabelle 60: Zustandskombinationen der OEE

Zustandskombination	P[Zustandskombination]	Zustand des OEE-Knotens						P[Zustand des OEE   Zustandskombination]								
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI			
1	0	0,99994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0,6184	0,38154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0,40815	0,40815	0,18364	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0,40814	0,40814	0,18365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0,99994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
6	0	0,61215	0,38779	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	0	0,40402	0,40402	0,19189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	0,003515	0,40402	0,40402	0,1919	0	0	0	0,0014	0,00142	0,0007	0	0	0	0		
9	0	0,99994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
10	0	0,60908	0,39086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
11	0	0,40199	0,40199	0,19595	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
12	0,02193	0,40199	0,40199	0,19596	0	0	0	0,0088	0,00882	0,0043	0	0	0	0		
13	0	0,99994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
14	0	0,60603	0,39391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15	0	0,39998	0,39998	0,19997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
16	0,559023	0,39998	0,39998	0,19998	0	0	0	0,2236	0,2236	0,1118	0	0	0	0		
17	0	0,88343	0,11649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
18	0	0,44171	0,44171	0,11651	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
19	0	0,29153	0,29153	0,29153	0,12534	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20	0	0,29153	0,29153	0,29153	0,12535	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
21	0	0,8745	0,12541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
22	0	0,1295	0,6764	0,19403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
23	0	0	0,20722	0,54113	0,25159	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
24	0,001289	0	0	0,54184	0,45811	0	0	0	0	0,0007	0,0006	0	0	0		
25	0	0,87011	0,12981	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
26	0	0,12365	0,67489	0,2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
27	0	0	0,19819	0,54084	0,26092	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
28	0,008043	0	0	0,52106	0,47889	0	0	0	0	0,0042	0,0039	0	0	0		
29	0	0,86576	0,13416	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30	0	0,12026	0,67152	0,20815	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
31	0	0	0,19276	0,53815	0,26904	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
32	0,205022	0	0	0,50614	0,49381	0	0	0	0	0,1038	0,1012	0	0	0		
33	0	0,68711	0,31282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
34	0	0,34355	0,34356	0,31284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
35	0	0,22675	0,22675	0,22675	0,22675	0,093	0	0	0	0	0	0	0	0		
36	0	0,22675	0,22675	0,22675	0,22675	0,093	0	0	0	0	0	0	0	0		
37	0	0,68017	0,31976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
38	0	0	0,48002	0,51995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
39	0	0	0	0,33596	0,45638	0,2076	0	0	0	0	0	0	0	0		
40	0,000317	0	0	0	0,55606	0,4439	0	0	0	0	0,0002	0,0001	0	0		
41	0	0,67675	0,32318	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
42	0	0	0,47277	0,5272	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
43	0	0	0	0,32551	0,45650	0,2179	0	0	0	0	0	0	0	0		
44	0,001975	0	0	0	0,52836	0,4716	0	0	0	0	0,001	0,0009	0	0		
45	0	0,67337	0,32657	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
46	0	0	0,46724	0,53273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
47	0	0	0	0,31864	0,45423	0,2271	0	0	0	0	0	0	0	0		
48	0,050356	0	0	0	0,50856	0,4914	0	0	0	0	0,0256	0,0247	0	0		
49	0	0,6184	0,38154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
50	0	0,3092	0,3092	0,3092	0,07234	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
51	0	0,20407	0,20407	0,20407	0,20407	0,1837	0	0	0	0	0	0	0	0		
52	0	0,20407	0,20407	0,20407	0,20407	0,1837	0	0	0	0	0	0	0	0		
53	0	0,61215	0,38779	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
54	0	0	0,30063	0,55196	0,14735	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
55	0	0	0	0,04379	0,49035	0,4658	0	0	0	0	0	0	0	0		
56	0,000893	0	0	0	0	1,0926	0	0	0	0	0	0	0	0,001		
57	0	0,60908	0,39086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
58	0	0	0,29216	0,55146	0,15632	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
59	0	0	0	0,02929	0,49149	0,4792	0	0	0	0	0	0	0	0		
60	0,005573	0	0	0	0	1,0481	0	0	0	0	0	0	0	0,0058		
61	0	0,60603	0,39391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
62	0	0	0,28664	0,54871	0,1646	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
63	0	0	0	0,02188	0,48905	0,489	0	0	0	0	0	0	0	0		
64	0,142065	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,14206		
		<b>P[Zustand des OEE-Knotens]</b>						<b>0</b>	<b>0,23</b>	<b>0,234</b>	<b>0,23</b>	<b>0,133</b>	<b>0,175</b>			

Tabelle 61: Zustandswahrscheinlichkeit der OEE

### 3.3.7.5 Zuverlässigkeit

Der Knotenpunkt Zuverlässigkeit besitzt als Elternknotenpunkt den Maschinenstatus. Die Zustände „Maschine aus“ und „Rüsvorgang“ ergeben einen Wert von 0 % für die Zuverlässigkeit. Der Zustand „Maschine an“ des Elternknotenpunkt ergibt 100 % Zuverlässigkeit. Somit ergeben sich für die Zustände des Knotenpunktes Zuverlässigkeit folgende Wahrscheinlichkeiten:

Knoten	Zustand	Wahrscheinlichkeitswert
Zuverlässigkeit	0 %	78,57 %
	0 – 20 %	0 %
	20 – 40 %	0 %
	40 – 60 %	0 %
	60 – 80 %	0 %
	80 – 100 %	21,42 %

Abbildung 71: Zustandswahrscheinlichkeit der Zuverlässigkeit

### 3.3.7.6 CPT der KPIs

Die gesammelten Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KPI-Ebene befinden sich in der nachfolgenden Tabelle:

Knoten	Zustand	Wahrscheinlichkeitswert
Innere Dauerverfügbarkeit	0 %	0 %
	0 – 20 %	6,09 %
	20 – 40 %	16,22 %
	40 – 60 %	43,43 %
	60 – 80 %	18,69 %
	80 – 100 %	15,57 %
Operative Dauerverfügbarkeit	0 %	0 %
	0 – 20 %	6,17 %
	20 – 40 %	16,97 %
	40 – 60 %	43,22 %
	60 – 80 %	18,62 %
	80 – 100 %	15,02 %
Instandhaltbarkeit	0 %	13 %
	0 – 20 %	0 %
	20 – 40 %	0 %
	40 – 60 %	30,12 %
	60 – 80 %	46,62 %
	80 – 100 %	10,26 %
Gesamtanlageneffizienz OEE	0 %	0 %
	0 – 20 %	23,38 %
	20 – 40 %	23,38 %
	40 – 60 %	22,54 %
	60 – 80 %	13,25 %
	80 – 100 %	17,47 %
Zuverlässigkeit	0 %	78,57 %
	0 – 20 %	0 %
	20 – 40 %	0 %
	40 – 60 %	0 %
	60 – 80 %	0 %
	80 – 100 %	21,42 %

Tabelle 62: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KPI-Ebene

Nachdem die CPTs der KPI-Ebene befüllt sind, wird das Modell aktualisiert. Dadurch werden die Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände jedes Knotenpunktes über Balken visualisiert:

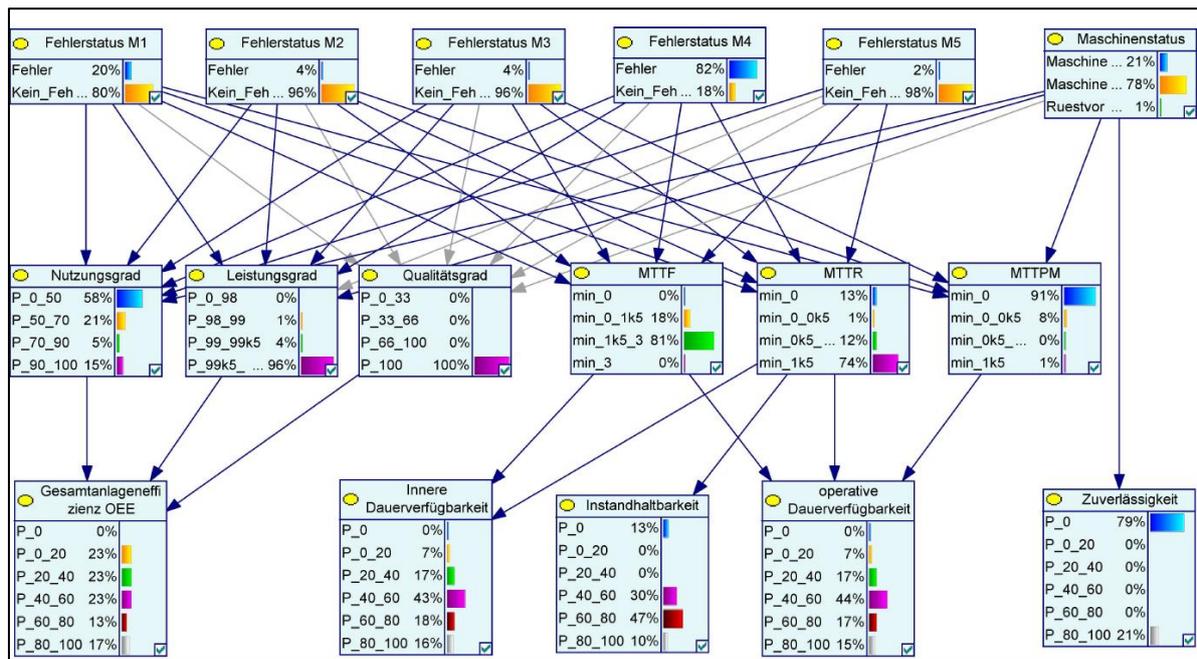


Abbildung 72: Visualisierte Zustände der KPI-Ebene

### 3.3.8 Manuelle Modellierung des DBN

Ein BN ist eine Momentaufnahme des Systems zu einer bestimmten Zeit und wird verwendet, um Systeme zu modellieren, die sich in einem Gleichgewichtszustand befinden. Die meisten Systeme ändern sich jedoch im Laufe der Zeit und es ist von Interesse, wie sich diese Systeme im Laufe der Zeit entwickeln. Daher wird ein Modell benötigt, das in der Lage ist, ein dynamisches System zu modellieren.

Ein DBN ist eine Erweiterung des BN um zusätzliche Mechanismen, die es erlauben, Einflüsse über die Zeit zu berücksichtigen. Dabei ändert sich die Netzwerkstruktur oder deren Parameter nicht. Der zugrundeliegende Prozess ist somit stationär. Das System wird allerdings dynamisch.

#### 3.3.8.1 Allgemeine Modellierung mit GeNIe SMILE

Für die Modellierung eines DBN in GeNIe SMILE wird eine Zeittafel aktiviert, die vier verschiedene Bereiche aufweist (siehe Abbildung 73):

- Contemporals: Dieser Bereich befindet sich außerhalb der Zeittafel und beinhaltet alle statischen Knoten. Ist eine kausale Beziehung zwischen einem statischen Knoten und einem Knoten der Temporal Plate vorhanden, so gilt diese Beziehung über jedes Zeitintervall.
- Init Conditions: Dieser Bereich befindet sich auf der linken Seite der Zeittafel und beinhaltet die sogenannten Ankerknoten. Diese Ankerknoten sind Elternknoten von einem bzw. mehreren Knoten aus dem Bereich der Temporal Plate.

Die Ankerknoten haben eine Ähnlichkeit zu den statischen Knoten, sind allerdings im Unterschied zu den statischen Knoten nur im ersten Zeitintervall mit den Kindknoten aus der Temporal Plate verbunden.

- **Temporal Plate:** Die Temporal Plate repräsentiert den Hauptteil des dynamischen Modells und befindet sich in der Mitte der Zeittafel. Die Knoten innerhalb dieses Bereichs können zeitlich veränderliche kausale Beziehungen in Form von temporalen Pfeilen aufweisen. Des Weiteren wird in diesem Bereich die Anzahl an Zeitintervallen für das dynamische Modell definiert.
- **Term Conditions:** Dieser Bereich befindet sich auf der rechten Seite der Zeittafel und beinhaltet die Schlussknoten. Die Schlussknoten haben einen bzw. mehrere Elternknoten in der Temporal Plate und sind mit diesen nur im letzten Zeitintervall verbunden.

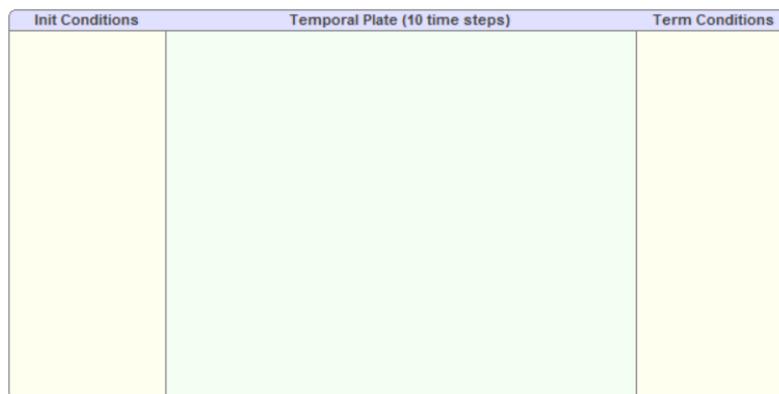
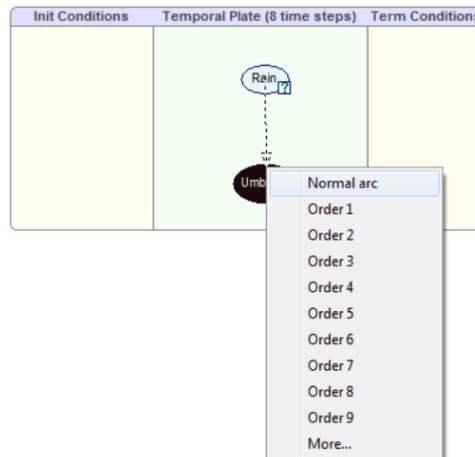


Abbildung 73: Die Zeittafel des DBN

Neben den kausalen Beziehungen die bereits im BN ausgeführt werden, wird in der Temporal Plate eine Modellierung von kausalen Beziehungen durch temporale Pfeile ermöglicht. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen, wobei die Abbildungen dazu aus GeNIe Help stammen:

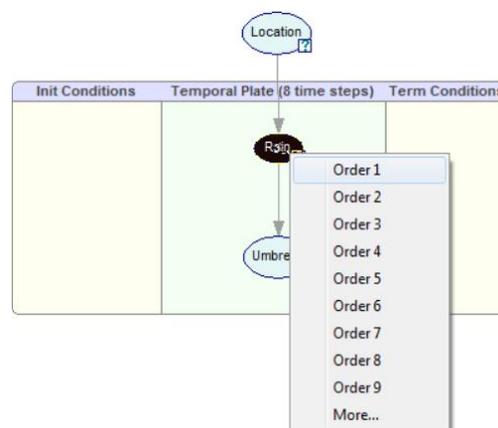
- Eine kausale Beziehung von zwei Knoten, denen unterschiedliche Zeitintervalle zugrunde liegen, wird durch einen temporalen Pfeil dargestellt. Der Elternknoten liegt dabei stets in jenem Zeitintervall, das weiter in der Vergangenheit liegt. Beim Anlegen der temporalen kausalen Beziehung wird die Ordnung der Beziehung ausgewählt. Diese bestimmt, wie viele Zeitintervalle zwischen den beiden Knoten liegen. Die Ordnung „normal arc“ gibt eine kausale Beziehung aus dem BN an, die keinerlei temporale Eigenschaft (die beiden Knoten liegen im selben Zeitintervall) besitzt. Die Ordnung „1“ gibt eine kausale Beziehung an, in welcher der Kindknoten aus dem betrachteten Zeitintervall und der Elternknoten aus dem Zeitintervall vor dem betrachteten Zeitintervall berücksichtigt werden. Die Nummer der Ordnung gibt dabei die Ordnungszahl an. Bei steigender Ordnungszahl wird zwischen den beiden Zeitintervallen der Knoten ein weiteres Zeitintervall eingegliedert (So beeinflusst bei Ordnung „6“ jener Elternknoten,

der sechs Zeitintervalle vor dem Zeitintervall des Kindknotens liegt, den Kindknoten.).



**Abbildung 74: Temporaler Pfeil zwischen zwei Knoten**

- Beeinflusst ein Knoten aus einem vergangenen Zeitintervall sich selbst im betrachteten Zeitintervall, so wird dies ebenfalls mit der Hilfe eines temporalen Pfeiles dargestellt. Dabei wird abermals über die Ordnungszahl angegeben, welche Zeitintervalle die kausale Beziehung beschreiben. Lediglich die Ordnung „normal arc“ entfällt, da sich derselbe Knoten im gleichen Zeitintervall nicht selbst beeinflussen kann.



**Abbildung 75: Temporaler Pfeil eines Knotens**

Durch die Einführung von neuen kausalen Beziehungen durch die temporären Pfeile werden die CPTs von einzelnen Knoten erweitert, indem eine Auswahloption für die zeitlichen Intervalle hinzukommt. Die CPTs der Knoten, die durch temporäre Pfeile beeinflusst werden, können sowohl in der Größe als auch in den Werten der Zellen bei der Betrachtung von unterschiedlichen zeitlichen Intervallen variieren.

Location	Pittsburgh	Sahara
true	0.7	0.01
false	0.3	0.99

Location	Pittsburgh	Sahara		
(Self) (t-1)	true	false	true	false
true	0.7	0.3	0.001	0.01
false	0.3	0.7	0.999	0.99

Abbildung 76: CPTs bei unterschiedlichen Zeitintervallen

### 3.3.8.2 Erstellung des DBN mit Pfeilen der Ordnung 1

Um aus dem manuell erstellten BN ein DBN zu bilden, werden die Knoten in den Bereich der Temporal Plate gezogen. Dabei gilt es zu beachten, dass sämtliche Knoten gleichzeitig in den Bereich verschoben werden müssen, da ansonsten die kausalen Beziehungen nicht korrekt umgewandelt werden.

Beim vorliegenden Modell beeinflussen sich die Knoten der KRI-Ebene über die Zeitintervalle selbst. Dies wird aus dem folgenden Szenario ersichtlich:

Tritt kein Fehler beim Fehlerstatus M1 im vergangenen Zeitintervall auf, so bleiben die Wahrscheinlichkeiten des Fehlerstatus M1 für das betrachtete Zeitintervall in der CPT ident. Erscheint eine Fehlermeldung im vergangenen Zeitintervall beim Fehlerstatus M1, so sind die Wahrscheinlichkeiten des Fehlerstatus M1 in dessen CPT andere als zuvor.

Daher gilt es den Zustand des vorigen Zeitintervalls zu betrachten. Es wird für jeden Knoten der KRI-Ebene ein temporaler Pfeil, der die Ordnungszahl 1 besitzt, zu sich selbst erstellt.

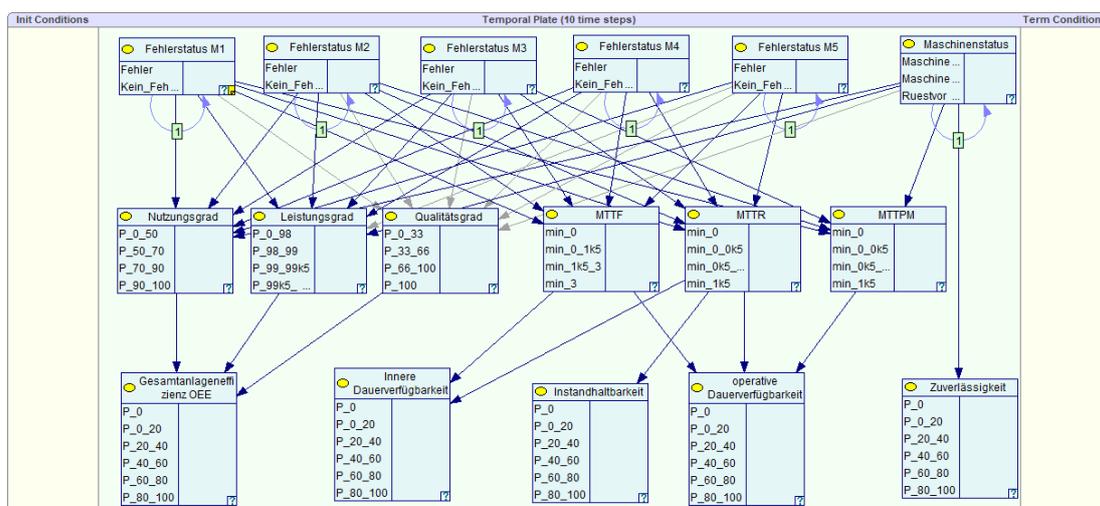


Abbildung 77: Berücksichtigung der temporalen Pfeile

Die Wahrscheinlichkeitstabellen der Fehlerstatusknoten (als Beispiel dient der Fehlerstatusknoten M1) bzw. des Maschinenstatusknoten werden anschließend wie folgt befüllt:

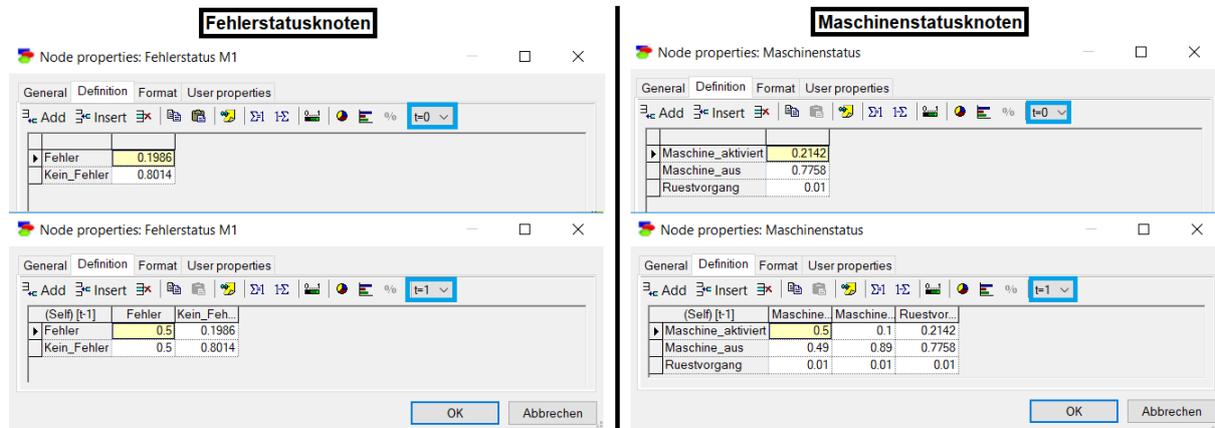


Abbildung 78: Befüllung der CPT mit Ordnung 1

Das DBN wird auf zehn Zeitintervalle gesetzt. Dadurch ergeben sich folgende zeitliche Verläufe für die Wahrscheinlichkeiten der Knoten:

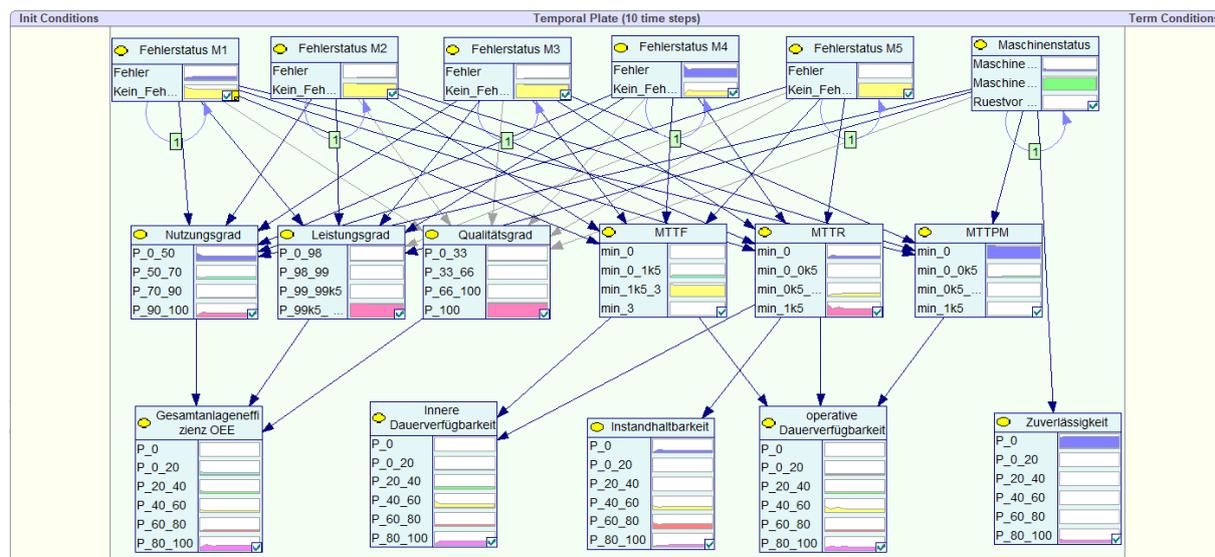


Abbildung 79: Das manuell modellierte DBN mit Ordnung 1

Durch die Anpassung der Wahrscheinlichkeiten der KPIs auf Grund der temporalen Pfeile zum Zeitpunkt  $t=1$  erfolgt ein Ausschlag der Wahrscheinlichkeitswerte, der sich in weiterer Folge wieder beruhigt. Die einzelnen Zustände der Knoten nähern sich ihren neuen Wahrscheinlichkeitswerten an. Beispielhaft wird dies in der folgenden Abbildung für den Knoten OEE dargestellt:

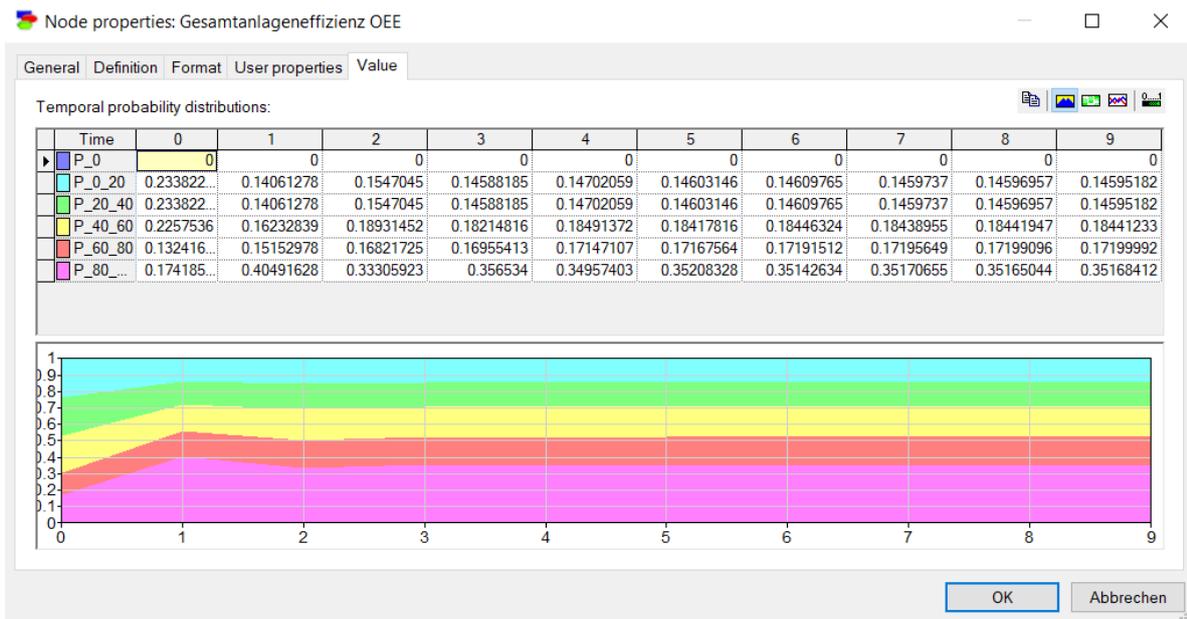


Abbildung 80: Wahrscheinlichkeiten des OEE-Knotens durch Ordnung 1

### 3.3.8.3 Erstellung des DBN mit Pfeilen der Ordnung 1 und 2

Die temporalen Pfeile zweiter Ordnung werden wie die temporalen Pfeile erster Ordnung erstellt. Die Matrix der KRIs wird durch die hinzugefügten Beziehungen abermals größer und muss somit neu befüllt werden:

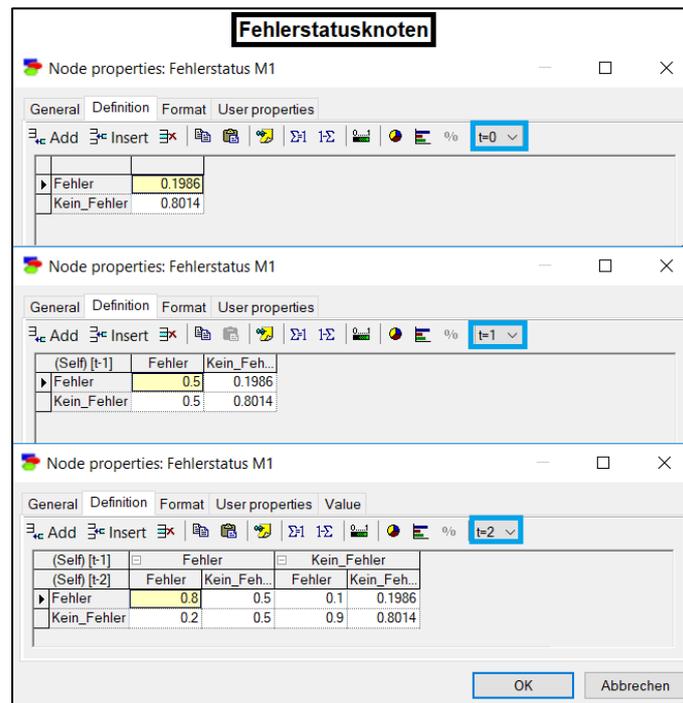


Abbildung 81: Befüllung der CPT mit Ordnung 1 und 2

Durch die Aktualisierung der Wahrscheinlichkeiten ergibt sich folgendes DBN:

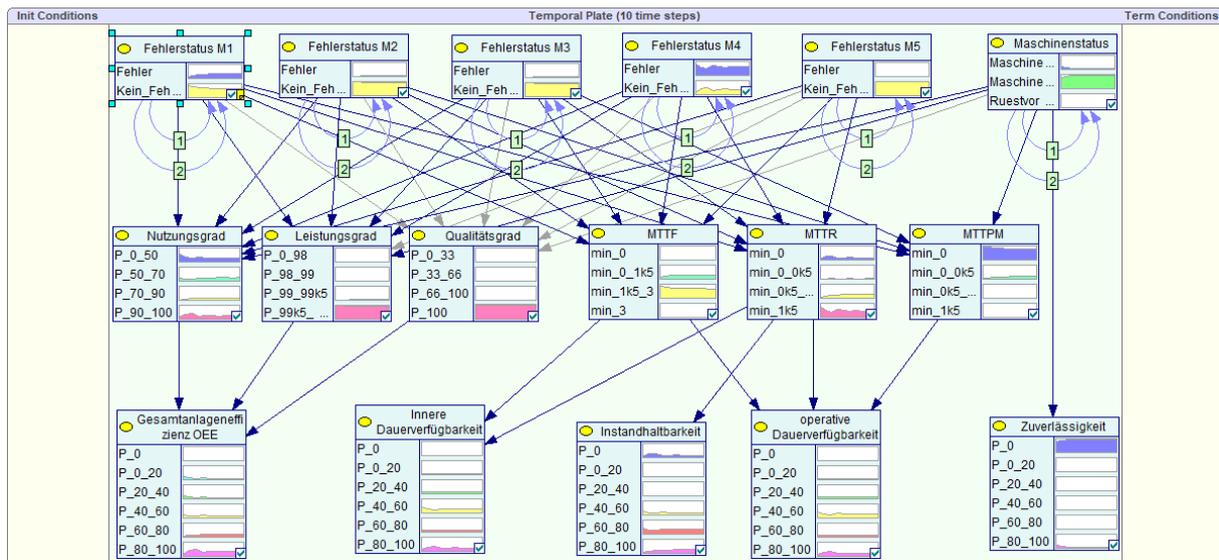


Abbildung 82: Das manuell erstellte DBN mit Ordnung 1 und 2

Durch die Anpassung der Wahrscheinlichkeiten der KPIs auf Grund der temporalen Pfeile zum Zeitpunkt  $t=1$  und  $t=2$  erfolgen zwei Ausschläge der Wahrscheinlichkeitswerte, die sich zeitlich weiter ausbreiten als beim Modell, in dem nur die Ordnung 1 berücksichtigt wird. Die einzelnen Zustände der Knoten nähern sich somit langsamer ihren neuen Wahrscheinlichkeitswerten an. Beispielhaft wird dies in der folgenden Abbildung für den Knoten OEE dargestellt:

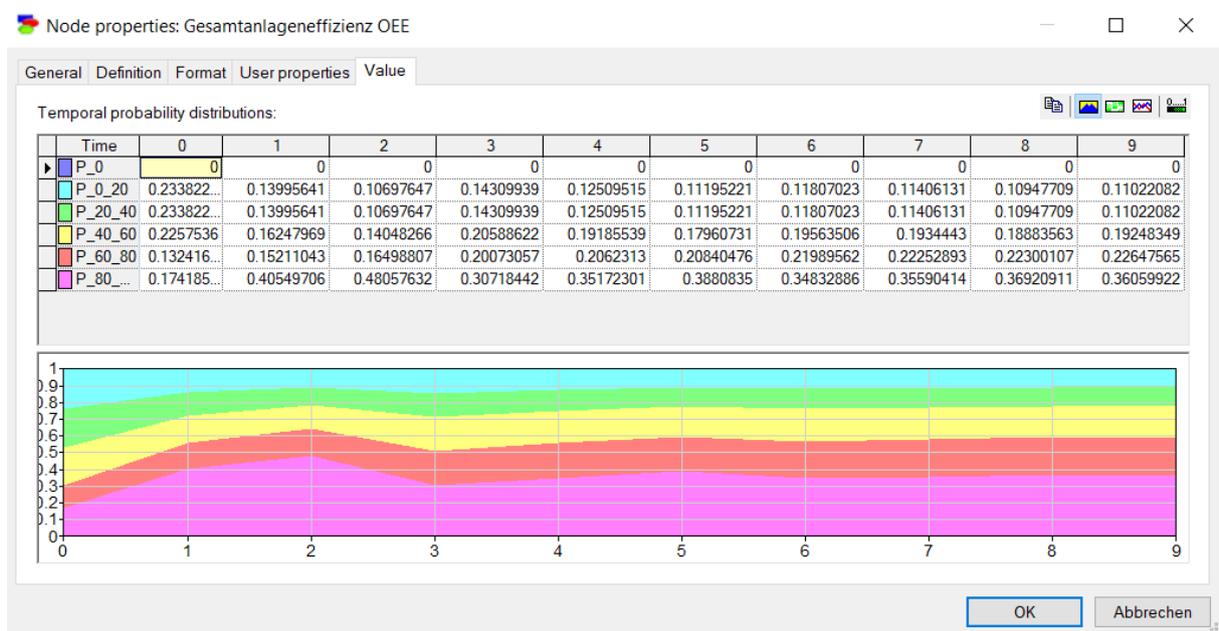


Abbildung 83: Wahrscheinlichkeiten des OEE-Knotens durch Ordnung 1 und 2

Für die Erstellung eines Modells, das dem realen Produktionsprozess entspricht, wird Expertenwissen für die Methode und den Prozess benötigt. So wird sichergestellt, dass sich die durch das Modell generierte Prognose in Zukunft bewahrheitet.

### 3.4 Automatisches Modellieren des BN

Die Software GeNIe SMILE bietet die Möglichkeit, auf Basis von Daten ein Modell automatisch zu generieren. Dafür stehen dem Benutzer verschiedene Lernalgorithmen zur Verfügung, die jeweils andere Eigenschaften besitzen. Für die Erstellung eines BN eignet sich der Lernalgorithmus „Bayesian Search“. Zunächst wird der Versuch unternommen, ein Modell direkt aus der Historienliste zu gewinnen.

Die Daten der Historienliste werden als Datentabelle in der Software GeNIe SMILE benötigt. Dazu werden die Daten aus der Excel-Tabelle zunächst in eine Access-Tabelle übertragen. Diese wird mit Hilfe der Standard-Anwendungsprogrammierschnittstelle ODBC (Open Database Connectivity) in GeNIe SMILE importiert. GeNIe SMILE implementiert den ODBC-Standard, da dieser den Zugriff auf die meisten Datenbankverwaltungssysteme ermöglicht.

ID	dt_databaseentry	dt_data	EntryID	flags	MachineID	ValueID	Value	ClientIP
76326.0	2017-06-28 06:58:33	2017-06-28 06:58:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884108.000000001	77.119.129.236
76334.0	2017-06-28 06:59:33	2017-06-28 06:59:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884117.0	77.119.129.236
76340.0	2017-06-28 07:04:42	2017-06-28 07:04:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884119.0	77.119.129.236
76342.0	2017-06-28 07:05:42	2017-06-28 07:05:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884169.0	77.119.129.236
76343.0	2017-06-28 07:06:42	2017-06-28 07:06:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884225.0	77.119.129.236
76344.0	2017-06-28 07:07:42	2017-06-28 07:07:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884281.000000001	77.119.129.236
76345.0	2017-06-28 07:08:42	2017-06-28 07:08:00	0.0	1.0	103.0	103.0	9884337.0	77.119.129.236

Abbildung 84: Die Historienliste in GeNIe

Sind die Daten einmal für die Software zugänglich, so kann über den Lernalgorithmus „Bayesian Search“ ein BN gebildet werden. Dieser wird an allen Spalten der Historientabelle angewendet. Nach dem Starten des Vorganges taucht jedoch eine Fehlermeldung auf. Dieser Algorithmus ist nicht für kontinuierliche Daten innerhalb einer Spalte geeignet:

**Learn New Network**

Columns:

- ID
- dt\_databaseentry
- dt\_data
- EntryID
- flags
- MachineID
- ValueID
- Value
- ClientIP

Learning Algorithm: Bayesian Search

Discrete threshold: 20

Algorithm Parameters:

Max Parent Count: 8

Iterations: 20

Sample Size: 50

Seed: 0

Link Probability: 0.1

Prior Link Probability: 0.001

Max Time (seconds): 0

Use Accuracy as Scoring Function

Class Variable: ID

Leave one out

K-fold crossvalidation

Fold count: 2

Buttons: Select All, Select None, OK, Cancel

→

GeNIe

Selected algorithm doesn't support continuous data columns

OK

Abbildung 85: Automatische Modellierung mit "Bayesian Search"

Um zumindest ein Teilergebnis für die automatische Modellierung zu erhalten, werden einzelne Spalten ausgewählt. Die meisten Spalten der Historientabelle stellen sich als ungeeignet für die automatische Modellierung eines BN dar. Lediglich die beiden Spalten dt\_data und Client IP eignen sich für den Lernalgorithmus „Bayesian Search“.

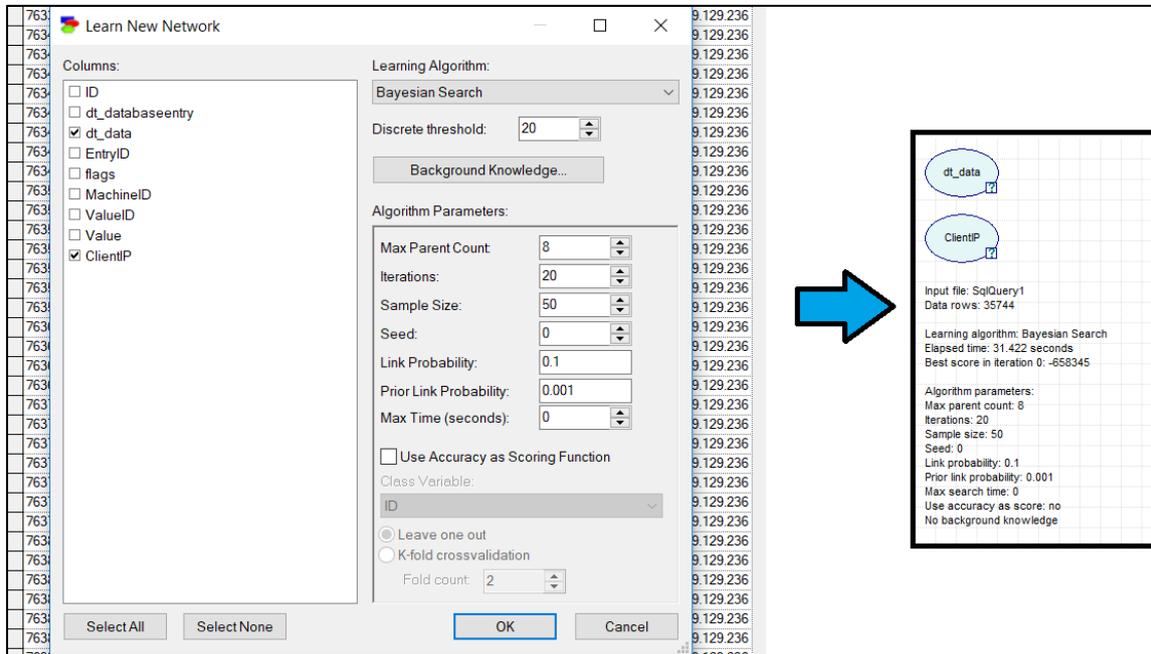


Abbildung 86: Automatische Modellierung durch einen Lernalgorithmus

Der Algorithmus kann keinen Zusammenhang zwischen den beiden Knotenpunkten herstellen. Die Zustände der Knotenpunkte sind lediglich durch die Zelleneinträge der einzelnen Spalten gegeben.

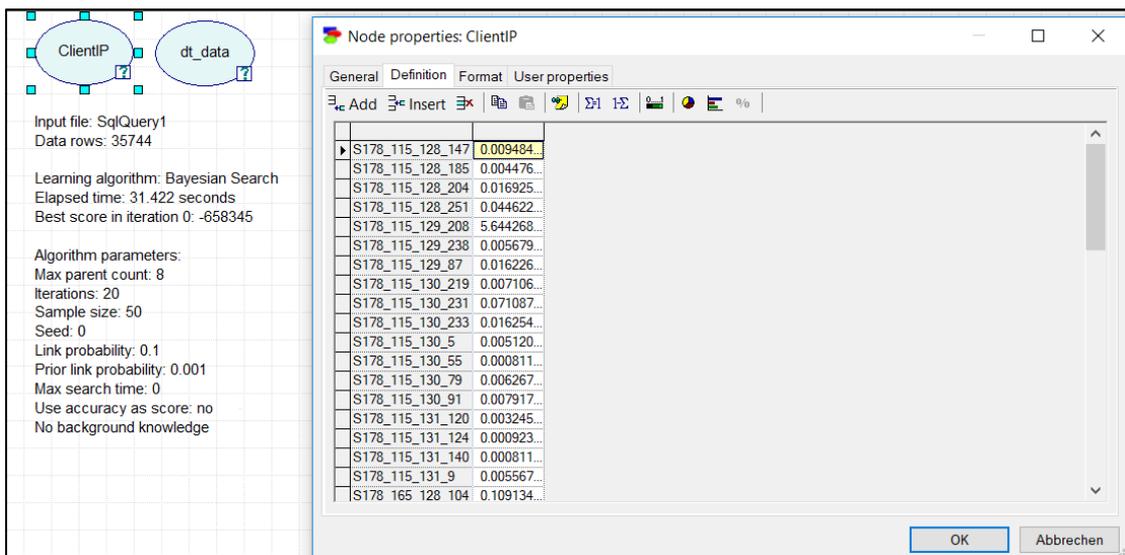


Abbildung 87: Das automatisch generierte Modell

Der Lernalgorithmus leitet aus der Spaltenbezeichnung die Knotenbezeichnung ab. Die Zustände eines Knotens werden durch die unterschiedlichen Zelleneinträge vorgegeben. Die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes ergibt sich aus der relativen Anzahl der Auftritte eines solchen Zustandes als Zelleneintrag in der betrachteten Spalte.

### 3.4.1 Erstellung einer neuen Datentabelle

Für die automatische Generierung eines BN wird die zugrundeliegende Datentabelle angepasst. Dies soll sicherstellen, dass auf Basis dieser modifizierten Datentabelle ein BN mit Hilfe des Lernalgorithmus „Bayesian Search“ automatisch erstellt werden kann.

#### 3.4.1.1 Erstellung der Tabelle „MaschFehler“

Die vorhandenen Spalten der Historienliste beinhalten zu wenig Information für das gewünschte Ergebnis der automatischen Modellierung, da als zeitliche Komponente lediglich der Zeitpunkt des Auftretens eines Maschinen- bzw. Fehlerzustandes festgehalten wird.

In Kapitel 3.1.6 wird deshalb die Historienliste in die „Liste der Maschinenzustände und in die „Listen der Fehlerzustände M1 – M5“ unterteilt und dadurch ermöglicht, dass die Dauer des Auftretens der einzelnen Datenzeilen der Historienliste (siehe Kapitel 3.2.1.2 und 3.2.2.2) ermittelt werden kann. Diese Spalte Dauer ist für die automatische Erstellung eines BN ebenfalls interessant und wird Zustandsdauer genannt, da die Benennung „Dauer“ in Access nicht zulässig ist.

Auf Grund der fehlenden Informationen wird als Ausgangspunkt nicht die Tabelle Historienliste herangezogen, sondern die Daten der Tabellen „Liste der Maschinenzustände“ und „Liste der Fehlerzustände M1 – M5“ zu einer Tabelle „MaschFehler“ zusammengeführt, indem die einzelnen Tabellen untereinander gesetzt werden. Damit eine chronologische Reihenfolge entsteht, werden die Datenzeilen nach der Spalte ID sortiert. Es wird also über Umwege die Möglichkeit geschaffen, dass für die Datenzeilen der Historienliste die Dauer (Zustandsdauer) ihres Auftretens ermittelt werden kann.

#### 3.4.1.2 Tabelle „MaschFehler“ exklusive Stückzahlaufzeichnungen

Der Lernalgorithmus „Bayesian Search“ verarbeitet Spalten auf Basis von diskreten Daten. Die Spalte „Value“ dient sowohl zur Identifikation des Maschinen- bzw. Fehlerzustandes als auch zur Angabe der absoluten Stückzahl und bietet somit keine Grundlage für diskrete Daten. Werden die Stückzahlaufzeichnungen nicht in der Tabelle berücksichtigt, beinhaltet die Spalte „Value“ diskrete Daten, da die Anzahl der unterschiedlichen Werte innerhalb dieser Spalte begrenzt ist und sich die Werte eindeutig voneinander abgrenzen. Daher können die Stückzahlaufzeichnungen bei der automatischen Modellierung nicht berücksichtigt werden.

Auf Grund dieser Tatsache wird bereits bei der Erstellung der Tabelle „MaschFehler“ auf die Inkludierung der Stückzahlaufzeichnungen verzichtet. Es werden lediglich die Tabellen „Liste der Maschinenzustände“ und „Listen der Fehlerzustände M1 – M5“ zusammengeführt.

#### **3.4.1.3 Änderung der Zustand-ID**

Da die Stückzahlaufzeichnungen bei der automatischen Modellierung nicht berücksichtigt werden, kann abermals die Zustand-ID herangezogen werden. Diese kann als diskret angesehen werden, da bei der Zustand-ID bestimmte Werte definiert und diese in ihrer Anzahl begrenzt sind und sich voneinander abgrenzen.

Die Software GeNIe SMILE erlaubt in den Zellen der Datentabelle Buchstaben, Zahlen und Unterstriche. Um die Zelleneinträge der Spalte „Zustand-ID“ für eine automatische Modellierung verwenden zu können, wird somit jeder Bindestrich mit einem Unterstrich ersetzt.

#### **3.4.1.4 Importieren der Tabelle „MaschFehler“**

Die Tabelle „MaschFehler“ wird mit Hilfe der Standard-Anwendungsprogrammierschnittstelle ODBC in GeNIe SMILE importiert.

### **3.4.2 Diskretisierung der kontinuierlichen Datenspalten**

Der Lernalgorithmus „Bayesian Search“ verarbeitet keine Spalten auf Basis von kontinuierlichen Daten. Um dieser Tatsache Abhilfe zu verschaffen, werden die Spalten mit kontinuierlichen Daten diskretisiert. Dafür bietet die Software GeNIe SMILE eine Funktion, die in weiterer Folge auf Basis der Spalte „ID“ erklärt wird.

GeNIe SMILE weist einer Spalte die Eigenschaft kontinuierlich für ihre Zelleneinträge zu, wenn die Anzahl der unterschiedlichen Zelleneinträge einen bestimmten Wert (in diesem Fall liegt der Wert bei 100) überschreitet und sich diese nicht eindeutig voneinander abgrenzen. Um die kontinuierlichen Daten einer Spalte in diskrete Daten zu transformieren, wird die Funktion „Discretize“ der Software verwendet. Diese Funktion teilt die Daten der ausgewählten Spalte in Bereiche ein, deren Anzahl (Bin Count, zwischen 2 und 100) vom Anwender festgelegt wird. Für die Spalte „ID“ wird eine Bereichsanzahl von 20 gewählt.

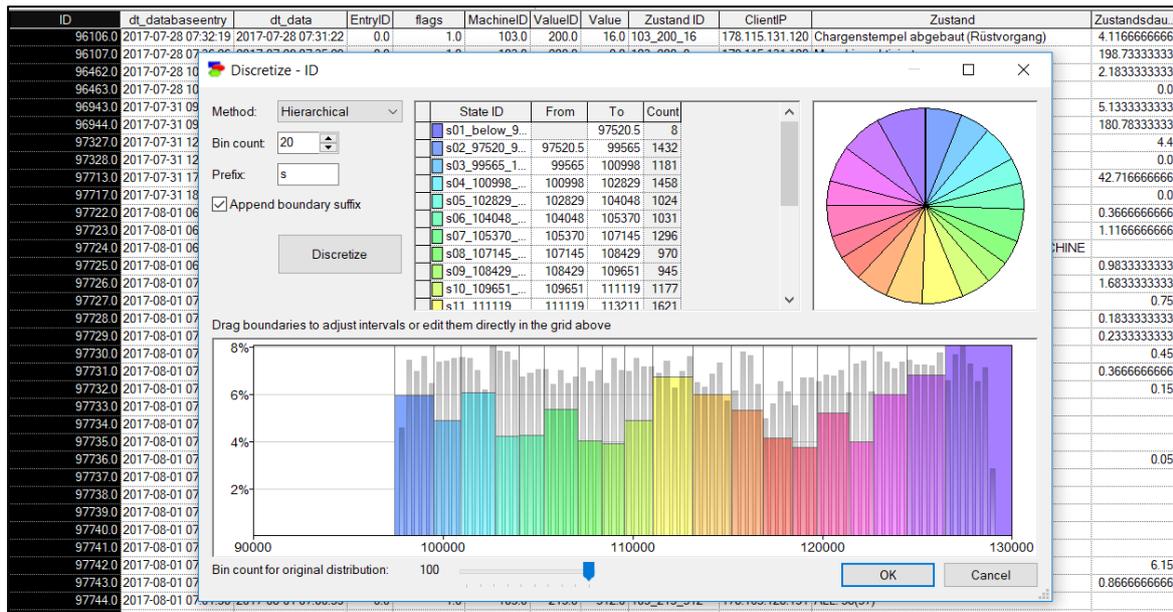


Abbildung 88: Diskretisierung der Spalte "ID"

Diese Bereiche werden mit ihren Grenzen sowohl in grafischer als auch in tabellarischer Form angezeigt. Die Anzahl der Datenzellen, die sich in den betrachteten Bereich einordnen, wird in der Spalte „Count“ angegeben. Die Datenzellen erhalten als neuen Wert ihren zugewiesenen Bereich. Die Funktion hat die Daten diskretisiert, indem die Anzahl der Werte begrenzt wurde und diese sich eindeutig voneinander unterscheiden.

Durch diesen Vorgang geht allerdings Information verloren. Vor dem Diskretisieren haben die Zelleneinträge der Spalte „ID“ eine eindeutige Reihenfolge der Zeilen vorgegeben. Durch das Diskretisieren haben einzelne Zellen gleiche Werte und die genaue Reihenfolge kann nicht weiter bestimmt werden.

Neben der Spalte „ID“ wird auch die Spalte „Zustandsdauer“ diskretisiert, für die eine Bereichsanzahl von 20 gewählt wird. Durch die Diskretisierung der beiden Spalten sind diese für eine automatische Generierung eines BN durch den Lernalgorithmus „Bayesian Search“ geeignet.

ID	dt_databaseentry	dt_data	EntryID	flags	MachineID	ValueID	Value	Zustand ID	ClientIP	Zustand	Zustandsdau
s01_below_97520	2017-07-28 07:32:19	2017-07-28 07:31:22	0.0	1.0	103.0	200.0	16.0	103_200_16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	s01_below_6
s01_below_97520	2017-07-28 07:36:26	2017-07-28 07:35:29	0.0	1.0	103.0	200.0	0.0	103_200_0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	s20_189_up
s01_below_97520	2017-07-28 10:55:05	2017-07-28 10:54:13	0.0	1.0	103.0	200.0	16.0	103_200_16	178.115.131.120	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	s01_below_6
s01_below_97520	2017-07-28 10:57:16	2017-07-28 10:56:24	0.0	1.0	103.0	200.0	0.0	103_200_0	178.115.131.120	Maschine aktiviert	s01_below_6
s01_below_97520	2017-07-31 09:09:11	2017-07-31 09:08:14	0.0	1.0	103.0	200.0	16.0	103_200_16	91.141.1.138	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	s01_below_6
s01_below_97520	2017-07-31 09:14:19	2017-07-31 09:13:22	0.0	1.0	103.0	200.0	0.0	103_200_0	91.141.1.138	Maschine aktiviert	s19_143_189
s01_below_97520	2017-07-31 12:15:05	2017-07-31 12:14:09	0.0	1.0	103.0	200.0	16.0	103_200_16	77.119.130.153	Chargenstempel abgebaut (Rüstvorgang)	s01_below_6
s01_below_97520	2017-07-31 12:19:29	2017-07-31 12:18:33	0.0	1.0	103.0	200.0	0.0	103_200_0	77.119.130.153	Maschine aktiviert	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-07-31 17:53:47	2017-07-31 17:52:56	0.0	1.0	103.0	210.0	2057.0	103_210_2057	178.165.128.131	kein Zustand hinterlegt	s11_42_45
s02_97520_99565	2017-07-31 18:36:33	2017-07-31 18:35:39	0.0	1.0	103.0	210.0	2057.0	103_210_2057	178.165.128.131	kein Zustand hinterlegt	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 06:59:37	2017-08-01 06:58:45	0.0	1.0	103.0	213.0	512.0	103_213_512	178.165.128.131	ALL 58(57)	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 06:59:48	2017-08-01 06:58:56	0.0	1.0	103.0	210.0	0.0	103_210_0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M1 aktiv!	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 06:59:57	2017-08-01 06:59:05	0.0	1.0	103.0	211.0	32.0	103_211_32	178.165.128.131	STÖRUNG NACHGESCHALTETE MASCHINE	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 06:59:58	2017-08-01 06:59:06	0.0	1.0	103.0	200.0	1.0	103_200_1	178.165.128.131	Maschine aus	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:00	2017-08-01 06:59:07	0.0	1.0	103.0	211.0	0.0	103_211_0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M2 aktiv!	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:00	2017-08-01 06:59:07	0.0	1.0	103.0	213.0	0.0	103_213_0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M4 aktiv!	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:44	2017-08-01 06:59:52	0.0	1.0	103.0	213.0	512.0	103_213_512	178.165.128.131	ALL 58(57)	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:55	2017-08-01 07:00:03	0.0	1.0	103.0	210.0	2050.0	103_210_2050	178.165.128.131	kein Zustand hinterlegt	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:55	2017-08-01 07:00:03	0.0	1.0	103.0	213.0	0.0	103_213_0	178.165.128.131	Kein Fehler bei M4 aktiv!	s01_below_6
s02_97520_99565	2017-08-01 07:00:57	2017-08-01 07:00:05	0.0	1.0	103.0	200.0	0.0	103_200_0	178.165.128.131	Maschine aktiviert	s01_below_6

Abbildung 89: Die Tabelle "MaschFehler" für die automatische BN-Modellierung

### **3.4.3 Automatische Generierung des BN durch die Tabelle „Masch-Fehler“**

Für die automatische Generierung eines BN wird der Lernalgorithmus „Bayesian Search“ verwendet. Vor der Anwendung dieses Algorithmus werden die Spalten, die im BN als Knotenpunkte ausgeführt werden sollen, ausgewählt und die Parameter für den Prozess der Netzwerkbildung eingestellt (siehe Abbildung 86).

Die Software hat gewisse Grenzen in der automatischen Erstellung eines BN. So wird der Prozess der Netzwerkbildung bei Auswahl bestimmter Spalten als Knotenpunkte nach bereits mehrminütiger Durchlaufzeit auf Grund einer Fehlermeldung (GeNIe SMILE reagiert nicht mehr) abgebrochen und das Programm geschlossen. Dies geschieht beispielsweise bei Inkludierung der Datumsspalten (dt\_databaseentry oder dt\_data) in das BN.

Die Datumsspalten sind bedeutend für die Analyse des Produktionsprozesses, da der betrachtete Zeitraum in das Netzwerk einfließt. So wird z.B. das Wissen, dass ein bestimmter Fehler während eines Zeitraumes vermehrt auftritt, zur Ursachenforschung dieses Fehlers beitragen. Im Fallbeispiel werden die Datumsspalten durch einen anderen Knotenpunkt in ihren Eigenschaften indirekt ersetzt. Die Spalte „ID“ enthält für jede Zeile eine Nummer, die nach ihrer Aufzeichnung fortlaufend vergeben wird. Sie stellt somit eine zeitliche Reihenfolge der Datenzeilen nach ihrem Aufzeichnungszeitpunkt in die Historienliste dar. Die Zellen der Spalte „ID“ lassen also eine zeitliche Zuordnung der betrachteten Zeile zu, ohne den genauen Zeitpunkt unmittelbar preiszugeben.

Da die Auswahl gewisser Spalten zum Abbruch der automatischen Generierung des BN führt, werden lediglich die vier Spalten „ID“, „Zustand-ID“, „Client IP“ und „Zustandsdauer“ berücksichtigt.

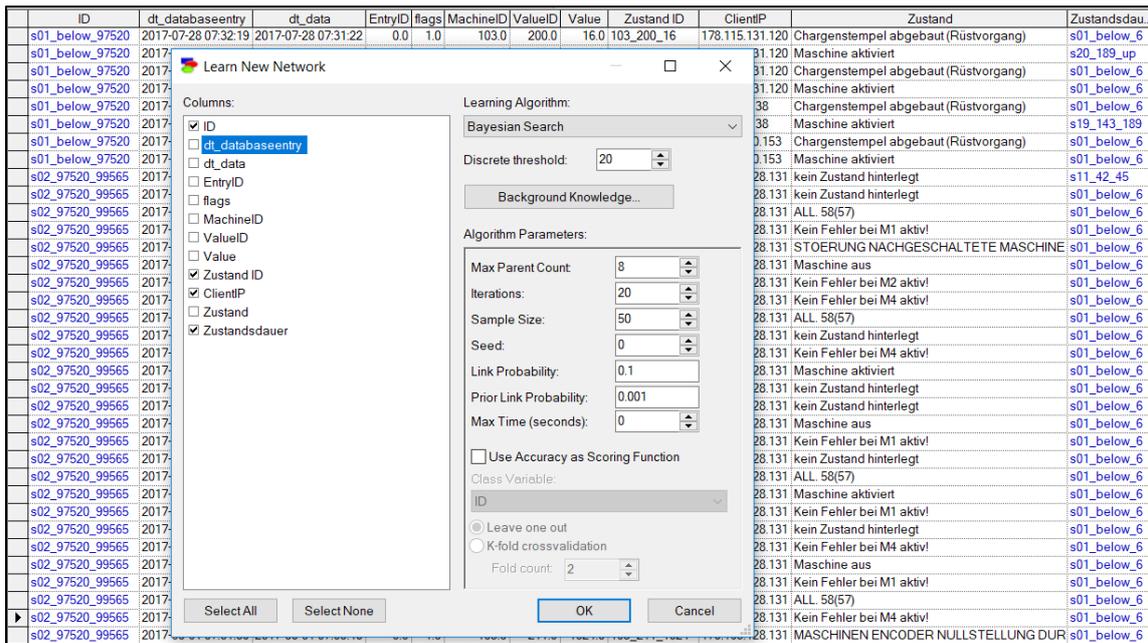


Abbildung 90: Automatische BN-Modellierung durch „MaschFehler“

Unter dem Punkt „Background Knowledge“ werden kausale Beziehungen, die das automatisch zu erstellende BN zu berücksichtigen hat, zwischen den Knotenpunkten definiert. Außerdem besteht die Möglichkeit, kausale Beziehungen vor der automatischen Erstellung des BN zu verbieten. Mit diesen Funktionen wird sichergestellt, dass das automatisch erstellte BN die gewünschte Aussagekraft des Anwenders besitzt.

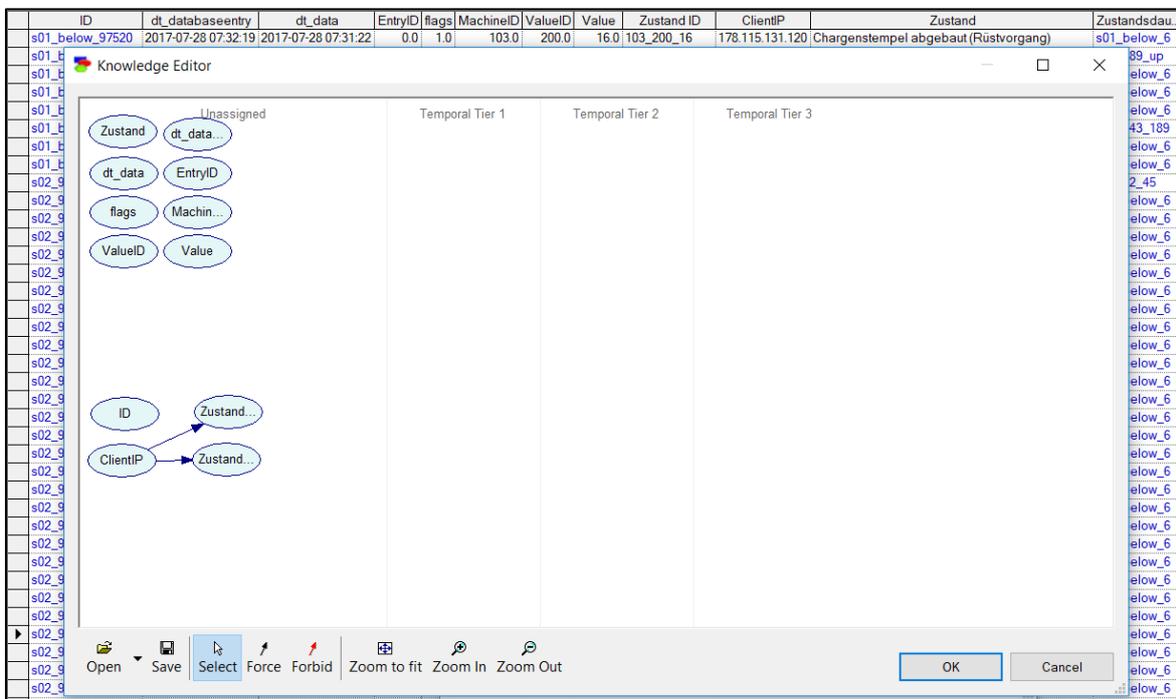


Abbildung 91: Vorgabe der kausalen Beziehungen

Im Fallbeispiel soll der Knotenpunkt „Client IP“ der Elternknoten der Knotenpunkte „Zustand-ID“ und „Zustandsdauer“ sein. Dadurch kann z.B. der Einfluss des Prozessverantwortlichen auf den hervorgerufenen Zustand bzw. die Zustandsdauer überprüft werden.

Nach Bestätigung des Lernalgorithmus wird das BN gebildet.

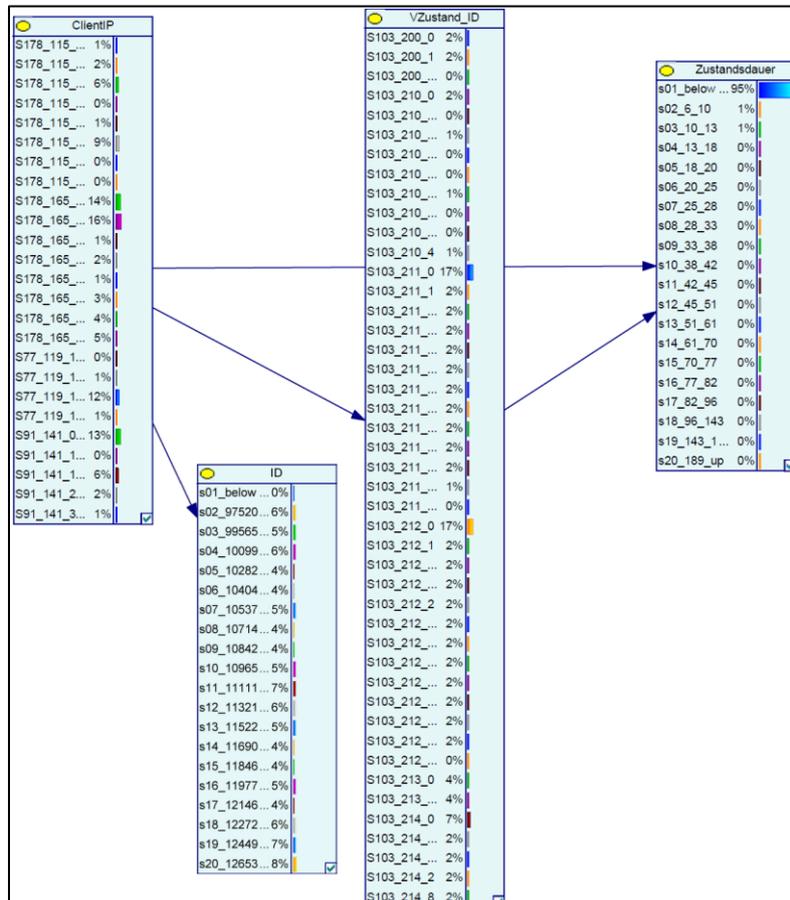


Abbildung 92: Automatisch erstelltes BN

Das Setzen bestimmter Zustände (siehe Kapitel 4.3.1.3) beantwortet wichtige Fragen über den Produktionsprozess:

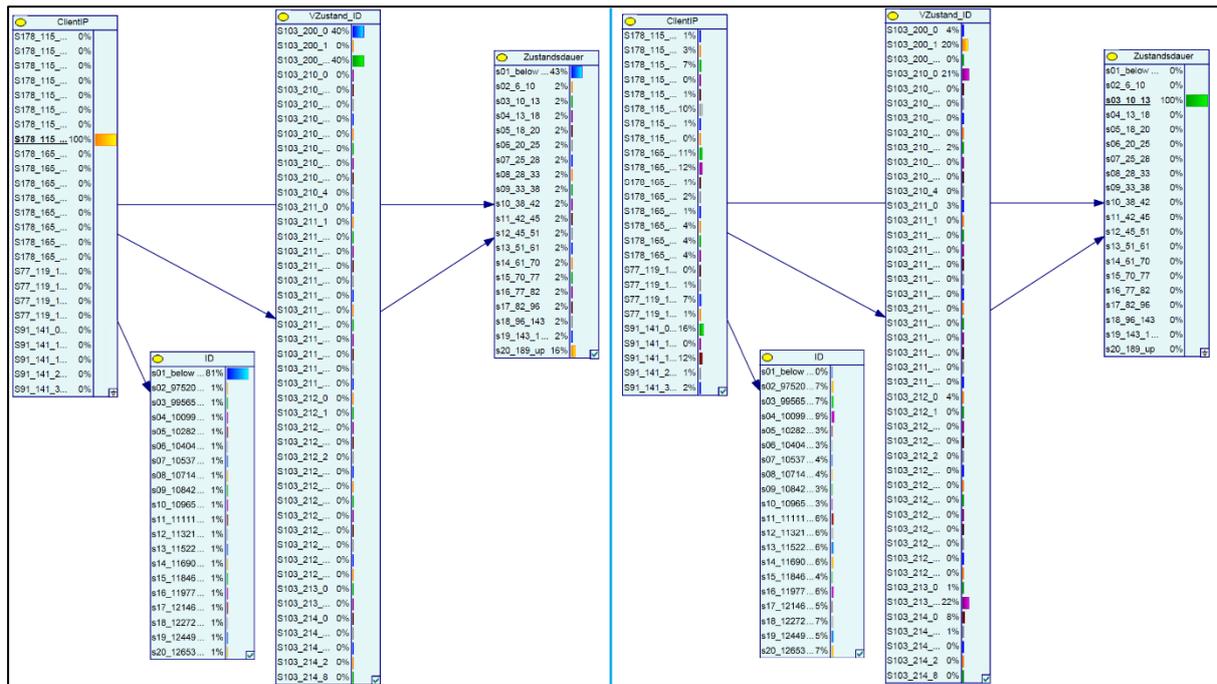


Abbildung 93: Setzen von Zustandes im automatisch erstellten BN

Im linken Teil der Abbildung 93 wird durch das Setzen des Zustandes ein Prozessverantwortlicher ausgewählt. So kann beispielsweise abgelesen werden, welche Zustände während der Arbeitszeit des ausgewählten Prozessverantwortlichen hervorgeufen werden. Außerdem wird das Ablesen die Zustandsdauer während dieser Arbeitszeit ermöglicht. Die ID gibt indirekt an, zu welcher Zeit der Prozessverantwortliche für den Produktionsprozess zuständig war.

Im rechten Teil der Abbildung 93 wird durch das Setzen des Zustandes eine bestimmte Zustandsdauer ausgewählt. Dies beantwortet z.B. die Frage, welche Fehlerzustände die ausgewählte Dauer aufweisen, bis diese behoben sind.

Durch das mehrfache Setzen von Zuständen in unterschiedliche Knoten können gezieltere Fragen beantwortet werden (z.B. Wann hat der betrachtete Prozessverantwortliche für den betrachteten Zustand eine Zustandsdauer von 10 Minuten erreicht?).

### 3.4.4 Automatische Modellierung des DBN

Auf Grund des nicht zufriedenstellenden Ergebnisses bei der automatischen Erstellung eines BN wird auf eine automatische Erstellung des DBNs verzichtet.

## **3.5 Vergleich der beiden Modelle**

Es gilt das manuell erstellte BN mit dem automatisch erstellten BN zu vergleichen, um die Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile der beiden Herangehensweisen aufzuzeigen.

### **3.5.1 Aufwand für die Datenaufbereitung**

Bei der manuellen Erstellung des BN wird erheblicher Aufwand für die Datenaufbereitung betrieben. Zunächst wird die Historienliste aufgeteilt, um im Anschluss die Maschinen- und Fehlerzustände zu analysieren und die weiteren Kennzahlen zu berechnen. In weiterer Folge werden die Zelleninhalte für die CPTs der einzelnen Knotenpunkte berechnet. Die Berechnung der Kennzahlen (RI/PIs und KPIs) sowie die anschließende Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der CPTs der Knotenpunkte stellt dabei die zeitintensive Arbeit der Datenaufbereitung dar.

Bei der automatischen Erstellung wird nach der Aufteilung der Historienliste die Dauer der Maschinen- und Fehlerzustände berechnet. Im Anschluss werden die Maschinen- und Fehlerzustände wieder zusammengeführt und die Spalten auf Basis von kontinuierlichen Daten diskretisiert.

Demnach wird für die manuelle Erstellung mehr Aufwand betrieben, um ein aussagekräftiges Modell zu erzeugen.

### **3.5.2 Zeitlicher Aufwand für die Modellierung**

Bei der manuellen Erstellung des BN müssen zunächst die Knotenpunkte modelliert werden, um im Anschluss die kausalen Beziehungen einzutragen. Im Anschluss werden die CPT der einzelnen Knotenpunkte befüllt.

Für die automatische Erstellung des BN werden die gewünschten kausalen Beziehungen vorgegeben. Der Lernalgorithmus benötigt Zeit, um das Netzwerk zu generieren.

Die manuelle Erstellung des BN ist durch die Befüllung der CPTs deutlich zeitintensiver als die automatische Modellierung. Außerdem wird bei der manuellen Erstellung des BN viel Bedenkzeit für das Auswählen von benötigten Knotenpunkten und das Setzen der kausalen Beziehungen benötigt.

### **3.5.3 Komplexität des Modells**

Das manuell erstellte BN birgt die Möglichkeit in sich, eine hohe Anzahl an Knotenpunkten und kausalen Beziehungen zu verwenden.

Automatisch generierte BN sind durch die Software und den Lernalgorithmus limitiert. Die Verwendung des Lernalgorithmus ist für die Modellierung komplexerer Netzwerke nicht möglich.

### **3.5.4 Genauigkeit der Ergebnisse**

Die Genauigkeit der Ergebnisse des manuell erstellten BN hängt von der zugrundeliegenden Berechnung ab und wird durch eine exakte Berechnung ohne Näherungsverfahren gesteigert.

Die Genauigkeit des automatisch erstellten BN wird durch das Diskretisieren einzelner Spalten gesenkt.

### **3.5.5 Informationsgehalt**

Der Informationsgehalt ist beim manuell erstellten BN durch den Anwender beeinflussbar. Dieser entscheidet, welche Zusammenhänge im Netzwerk abgebildet werden. Dadurch wird auch jene Information abgebildet, die vom Anwender benötigt wird.

Beim automatisch erstellten BN wird der Informationsgehalt von den zugrundeliegenden Daten und dem Lernalgorithmus beeinflusst. Der Lernalgorithmus ist in seiner Verwendung limitiert und ist somit auch nicht geeignet für die Abbildung jeglicher Informationen.

### **3.5.6 Aussagekraft für das Fallbeispiel**

Im manuell erstellten BN werden die KPIs (innere und operative) Dauerverfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Gesamtanlageneffizienz und Instandhaltbarkeit in Abhängigkeit der Maschinen- bzw. Fehlerzustände berechnet. Außerdem werden MTTF, MTTR und MTTM im Modell berücksichtigt. Diese Kennzahlen beinhalten weitreichende Informationen über den Produktionsprozess.

Das automatisch erstellte BN beinhaltet im Gegensatz zum manuell erstellten BN den Prozessverantwortlichen als Information. Die Aussagekraft hält sich auf Grund der niedrigen Komplexität in Grenzen.

### **3.5.7 Robustheit**

Unter Robustheit wird die Eigenschaft der Methode beschrieben, auch unter ungünstigen Bedingungen noch zuverlässig zu funktionieren. Das manuell erstellte BN lässt sich unter jeglichen Bedingungen erstellen und auch auf Veränderungen reagiert es ohne jegliche Komplikationen.

Das automatisch erstellte BN wurde weitestgehend angepasst, um keine Fehlermeldung zu erhalten. Die ersten Versuche zur automatischen Erstellung eines BN führten

zu einem Programmabsturz. Erst das sukzessive Vereinfachen der Datengrundlage und der Modellvorgaben führt zu einem Ergebnis.

### 3.5.8 Anpassungsfähigkeit

Eine Anpassung des manuell modellierten BN führt zu einer Veränderung der CPTs. Dies erfordert eine erneute Berechnung bzw. Abschätzung der Wahrscheinlichkeitswerte und ist somit mit einem hohen Aufwand verbunden. Das manuell erstellte BN lässt sich, auch wenn mit erheblichen Aufwand verbunden, beliebig in seinem Umfang und den kausalen Beziehungen anpassen.

Die Anpassung des automatisch modellierten BN erfolgt durch eine neuerliche Analyse der Datentabelle und damit einer erneuten automatischen Erstellung des BN. Dieser Vorgang erfolgt mit ähnlicher Geschwindigkeit wie die erstmalige Erstellung des Modells. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass der Anpassung in ihrem Umfang und den kausalen Beziehungen dieselben Grenzen gesteckt sind, wie bei der erstmaligen Erstellung des Modells.

### 3.5.9 Vergleichsübersicht

Um einen übersichtlichen Vergleich in mehreren Kategorien zu erzielen, wird ein tabellarischer Vergleich angeführt. Die Bewertung der einzelnen Kategorien reicht von äußerst positiv bis äußerst negativ (++, +, o, -, --) und wird Anhand von Erfahrungswerten aus der Modellbildung des Fallbeispiels durchgeführt.

Wenig Aufwand für die Datenvorbereitung, wenig zeitlicher Aufwand für die Modellierung, große Komplexität des Modells, hohe Genauigkeit der Ergebnisse, ein hoher Informationsgehalt, eine hohe Aussagekraft für das Fallbeispiel, eine hohe Robustheit und eine hohe Anpassungsfähigkeit werden als (äußerst) positiv (++) gewertet.

	Manuelle Erstellung des BN	Automatische Erstellung des BN
<b>Aufwand für die Datenaufbereitung</b>	-	+
<b>Zeitlicher Aufwand für die Modellierung</b>	-	+
<b>Komplexität des Modells</b>	++	-
<b>Genauigkeit der Ergebnisse</b>	+	o
<b>Informationsgehalt</b>	++	-
<b>Aussagekraft für das Fallbeispiel</b>	++	o
<b>Robustheit</b>	+	-
<b>Anpassungsfähigkeit</b>	o	o

Abbildung 94: Vergleichsübersicht der beiden Modelle

---

Für die manuelle Erstellung des BN wird erheblich mehr Aufwand für die Datenaufbereitung nötig und auch der zeitliche Aufwand bei der Modellierung ist größer. Dafür ist ein deutlich umfangreicheres Netzwerk als Ergebnis möglich (höhere Komplexität).

Während die Genauigkeit des Ergebnisses des manuell erstellten Modells von der Berechnungsgrundlage (oder vom Expertenwissen) abhängt, sinkt die Genauigkeit des automatischen Modells durch das Diskretisieren.

Der Informationsgehalt ist beim manuell erstellten Modell größer, da die Komplexität des Modells deutlich höher ist. Die Daten für ein automatisch erstelltes BN werden aus einer Tabelle gewonnen, obwohl sich oftmals nicht alle benötigten Informationen in einer Tabelle vereinen lassen. Durch die Grenzen des Lernalgorithmus (Softwareabsturz) ist die Verarbeitung von benötigten Informationen in einigen Fällen unmöglich.

Für den betrachteten Produktionsprozess hat das manuell erstellte Modell mehr Aussagekraft, da das Netzwerk nicht nur Informationen zur Dauer der Maschinen- bzw. Fehlerzustände beinhaltet, sondern auch die KPIs (innere und operative) Dauerverfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Gesamtanlageneffizienz und Instandhaltbarkeit berechnet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Allgemeine Erkenntnis

Beim Erstellen eines BN gilt es zu beachten, dass die Zustände der einzelnen Knoten in ihrer Anzahl so gering wie möglich gehalten werden sollen. Dies dient nicht nur der Übersichtlichkeit des Modells. Die Anzahl der Zustände der Elternknoten bestimmt auch die Spaltenanzahl der CPT des betrachteten Knotens. Dazu ein kurzes Beispiel:

Verdoppelt sich die Zustandsanzahl bei fünf Elternknoten, so wird die Spaltenanzahl der CPT des betrachteten Knotens um den Faktor 32 erhöht und damit die Zellenanzahl der CPT erheblich vergrößert. Dies am manuell erstellten BN ausgeführt bedeutet folgendes: Die Zustandsanzahl der Fehlerstatusknoten wird jeweils von zwei auf vier erhöht. Die ursprüngliche Spaltenanzahl der CPT des MTTF-Knotens beträgt 32. Durch die Verdopplung der Zustandsanzahl der Elternknoten ergibt sich eine Spaltenanzahl von 1024. Während eine Spaltenanzahl von 32 eine Zellenanzahl von 128 für die CPT ergibt, führt eine Spaltenanzahl von 1024 zu einer Zellenanzahl von 4096 für die CPT.

Eine Steigerung von zwei auf vier Zustände bei Knoten, die Elternknoten für andere Knoten darstellen, führt daher zu einem erheblichen Mehraufwand, dessen Verwirklichung wohl überdacht werden muss. Dabei gilt es abzuwägen, ob dieser Mehraufwand mit einem Mehrwert des Modellergebnisses aufgefangen wird.

### 4.2 Erkenntnisse zum Produktionsprozess

Die Fehlerstatuskategorie M4 weist für den Zustand Fehler eine relative Dauer von 82% auf. Dies geht auf den Fehlerzustand mit der Zustand-ID 103-213-512 zurück, der als „ALL. 58(57)“ in der Beschreibung deklariert ist. Damit die KPIs des Produktionsprozesses optimiert werden, muss die relative Dauer dieses Fehlerzustandes drastisch reduziert werden.

Der Qualitätsgrad weist bei jeglicher Konstellation seiner Elternknoten einen Wert von 100% auf. Dies folgt aus der Tatsache, dass Ausschuss bzw. Nacharbeit nicht in der Historienliste berücksichtigt werden. Um den exakten Wert der Gesamtanlageneffizienz zu ermitteln, wird eine Berücksichtigung dieser Faktoren unumgänglich. Im Modell selbst ist die fehlende Verbindung zwischen den Fehlerzustandskategorien (und somit den Fehlermeldungen) und dem Qualitätsgrad ebenfalls ersichtlich. Die grauen Pfeile zwischen den angesprochenen Knoten deuten auf eine fehlende Verbindung im Modell hin. Durch eine Adaption im Produktionsprozess (z.B. Messung der Produktanzahl, die

eine Nacharbeit benötigt, bzw. des Ausschusses über Sensoren) wird die exakte Ermittlung des Qualitätsgrades ermöglicht. Darum werden die Verbindungen der Knoten im manuell modellierten BN beibehalten.

Eine Fehlerzustandskategorie beinhaltet Fehlerzustände, die in unterschiedlichen Prozessschritten vorkommen. Die Fehlerzustände (bzw. Fehlermeldungen) sind den Fehlerzustandskategorien M1-M5 somit willkürlich zugeordnet. Dadurch ist nicht sofort ersichtlich, wo der Fehler im Produktionsprozess auftritt. Werden die Fehlerzustandskategorien M1-M5 den einzelnen Produktionsprozessschritten zugeordnet und somit die Fehlerzustände ihren Produktionsschritten (und damit dem Ort ihres Auftretens) zugewiesen, so wird beim Auftreten eines Fehlers bei einer Fehlerzustandskategorie sofort der dafür verantwortliche Prozessschritt identifiziert. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Prozessschritte bestimmbar.

In der Historienliste sind Fehlerzustände aufgeführt, die nicht definiert sind (Fehlerzustände mit der Value \*). Diese Fehlerzustände werden für ein exaktes Ergebnis des Modells in den Berechnungen berücksichtigt, obwohl die Eigenschaften nicht zu bestimmen sind. Daher werden Annahmen für die Zuteilung zu Wartung bzw. Instandhaltung oder den OEE-Parametern getroffen. Für die exakte Berechnung der KPIs müssen die Fehlerzustände, die nicht definiert sind, von einem Experten des Produktionsprozesses beschrieben werden.

Die Daten der Historienliste, auf die das Modell und diese Arbeit beruhen, basieren auf einer Zeitspanne, die kurz nach der Einrichtung des Produktionsprozesses startet. Die Daten sind auf Grund der noch fehlenden Optimierung des Prozesses nicht aussagekräftig für den zukünftigen Produktionsablauf. Außerdem ist die Zeitspanne, für die die Daten der Historienliste zur Verfügung stehen, zu kurz, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Damit ein Modell für Zukunftsprognosen aussagekräftig wird, müssen diesem Modell Daten zugrunde liegen, die in ihrer Menge und ihrem betrachteten Zeitraum repräsentativ für ein zukünftiges Ergebnis sind.

## **4.3 Erkenntnisse zur verwendeten Methode**

Die Erkenntnisse zur verwendeten Methode untergliedern sich in die manuelle Modellierung des BN bzw. DBN und die automatische Modellierung des BN.

### **4.3.1 Manuelle Modellierung des BN**

Für die manuelle Erstellung des BN wird sowohl Methodenwissen als auch das Wissen über das betrachtete System bzw. den betrachteten Prozess benötigt.

#### **4.3.1.1 Faktor Zeit und Ressourcen**

Das manuelle Erstellen eines BN ist äußerst zeit- und ressourcenintensiv. Neben der langen Dauer für die Erstellung des Modells wird auch eine große Menge an Daten

benötigt. Diese gilt es mittels Analyse aufzuarbeiten, um zu einem repräsentativen Ergebnis zu kommen. Der Faktor Zeit dürfte der Grund dafür sein, dass die Methode trotz ihres zufriedenstellenden Ergebnisses in der Praxis noch wenig Anklang findet.

#### 4.3.1.2 Fehlende kausale Beziehungen

Im Modell sind einige Pfeile weiterhin grau. Dies deutet darauf hin, dass der Elternknoten keine kausale Beziehung zum verbundenen Knoten aufweist. Im manuell erstellten Modell sind diese fehlenden kausalen Beziehungen dort anzufinden, wo die Elternknoten auf den Knotenpunkt Qualitätsgrad zeigen. Der Grund für die fehlenden kausalen Beziehungen ist die Tatsache, dass in den Daten, die als Grundlage für das Modell dienen, keine Qualitätsunterschiede aufgezeichnet werden. Außerdem werden Ausschuss bzw. Nacharbeit nicht berücksichtigt. Der Qualitätsgrad hat stets den Wert 1 und somit keinerlei kausale Beziehung zu den Elternknoten. Die Pfeile bleiben allerdings dennoch im Modell, da bei einer differenzierten Datengrundlage (z.B. Berücksichtigung von Ausschuss bzw. Nacharbeit) oder bei Hinzufügen neuer Fehlermeldungen die kausalen Beziehungen hergestellt werden.

#### 4.3.1.3 Setzen von Zuständen

Im BN kann bei Knotenpunkte jeweils ein Zustand gesetzt werden. Dieser Vorgang weist dem gesetzten Zustand eine Wahrscheinlichkeit von 100 % zu. Den übrigen Knoten des Modells, denen noch kein Zustand gesetzt wurde, werden im Anschluss ihre Wahrscheinlichkeiten für jeden Zustand neu berechnet. Das Setzen von Zuständen berücksichtigt somit im Modell, dass von bestimmten Knotenpunkten die Zustände (zu bestimmten Zeitpunkten) bekannt sind und zeigt die Auswirkung auf die übrigen Knotenpunkte. Die gesetzten Zustände sind dabei unterstrichen und hervorgehoben.

Das Setzen von Zuständen kann auch der Validierung des Modells dienen, indem bestimmte Zustände von Knotenpunkten gesetzt werden und im Anschluss überprüft wird, ob die Änderung der übrigen Wahrscheinlichkeiten den eigenen Erwartungen entspricht.

Als Beispiel soll das Setzen des Zustandes „80 – 100%“ der operativen Dauerverfügbarkeit dienen. Eine Frage hierzu könnte lauten:

*Wie bekomme ich eine hohe operative Dauerverfügbarkeit? Wie müssen meine KRIs aussehen, um eine hohe operative Dauerverfügbarkeit zu erhalten?*

Eine hohe operative Dauerverfügbarkeit erfordert eine hohe MTTF und eine niedrige MTTR bzw. MTTPM. Um dies zu erreichen, muss beim Fehlerstatus M4 die Wahrscheinlichkeit für den Zustand „Kein Fehler“ drastisch erhöht werden. Die erhöhte operative Dauerverfügbarkeit führt in weiterer Folge zu einer hohen inneren Dauerverfügbarkeit. Die Instandhaltbarkeit sinkt drastisch, da die MTTR geringgehalten wird. Die weiteren Auswirkungen befinden sich in der folgenden Abbildung:

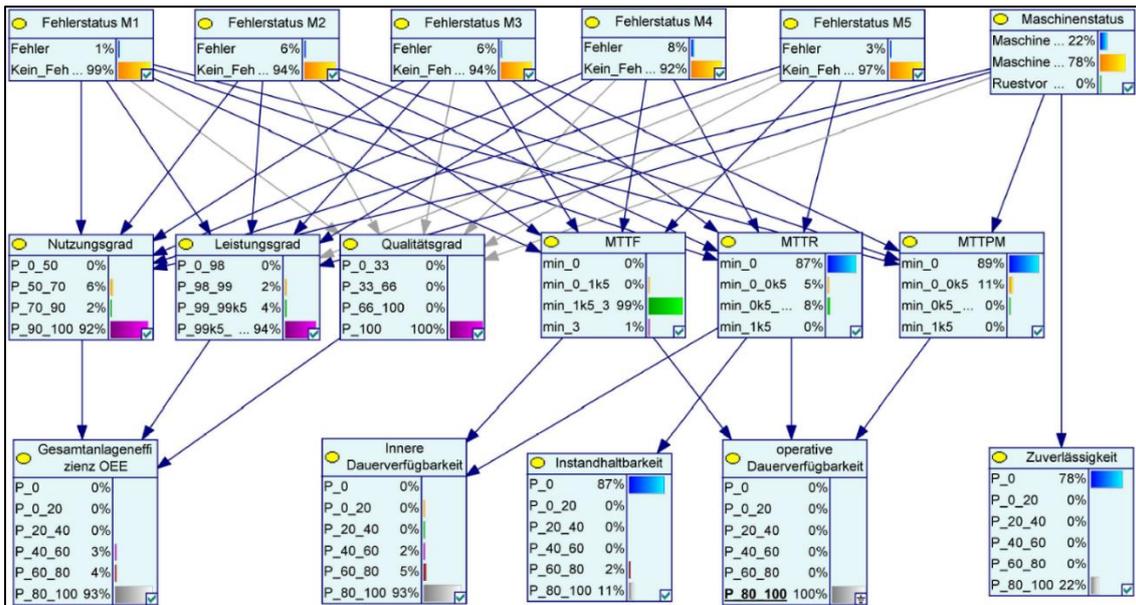


Abbildung 95: Setzen einer hohen operativen Dauer Verfügbarkeit

Ein weiteres Beispiel ist das Setzen des Zustandes „kein Fehler“ für den Knotenpunkt Fehlerstatus M4. Eine Frage hierzu könnte lauten:

*Wie sehen die Werte der KPIs aus, wenn ich sicherstellen kann, dass kein Fehler beim Fehlerstatus M4 auftritt?*

Wenn beim Fehlerstatus M4 kein Fehler auftritt, steigt die MTTF und sinkt die MTTR bzw. MTTPM. Dies führt zu einer hohen operativen und inneren Dauer Verfügbarkeit. Außerdem sinkt die Instandhaltbarkeit. Die weiteren Auswirkungen können in der folgenden Abbildung betrachtet werden:

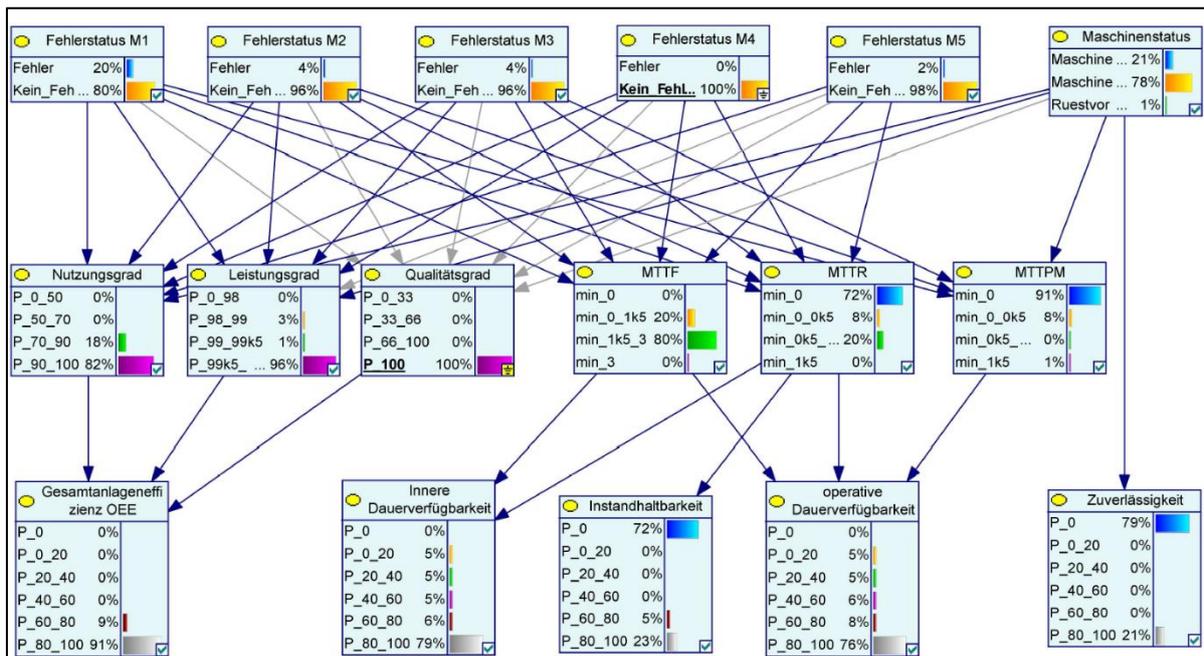


Abbildung 96: Setzen des Zustandes kein Fehler beim Fehlerstatus M4

Das Setzen von Zuständen dient daher nicht nur der Validierung des Modells, sondern kann in diesem Fall auch betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Fragen beantworten.

### 4.3.2 Manuelle Modellierung des DBN

Das DBN berücksichtigt Abhängigkeiten von Knoten auf Basis von unterschiedlichen Zeitintervallen. Ist die Vergangenheit des betrachteten Systems bekannt, wird dadurch die Vorhersage von gegenwärtigen bzw. zukünftigen Zeitintervallen ermöglicht.

Durch das Hinzufügen von temporalen Pfeilen erfahren die Wahrscheinlichkeiten der Zustände (bei der Betrachtung über die Zeitintervalle) Ausschläge in ihren Werten. Diese Ausschläge pendeln sich bei einer hohen Ordnungszahl und mehreren temporalen Pfeilen später ein. Um die korrekten Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände eines Knotens zu erhalten, muss daher die eingestellte Anzahl der betrachteten Zeitintervalle ausreichen.

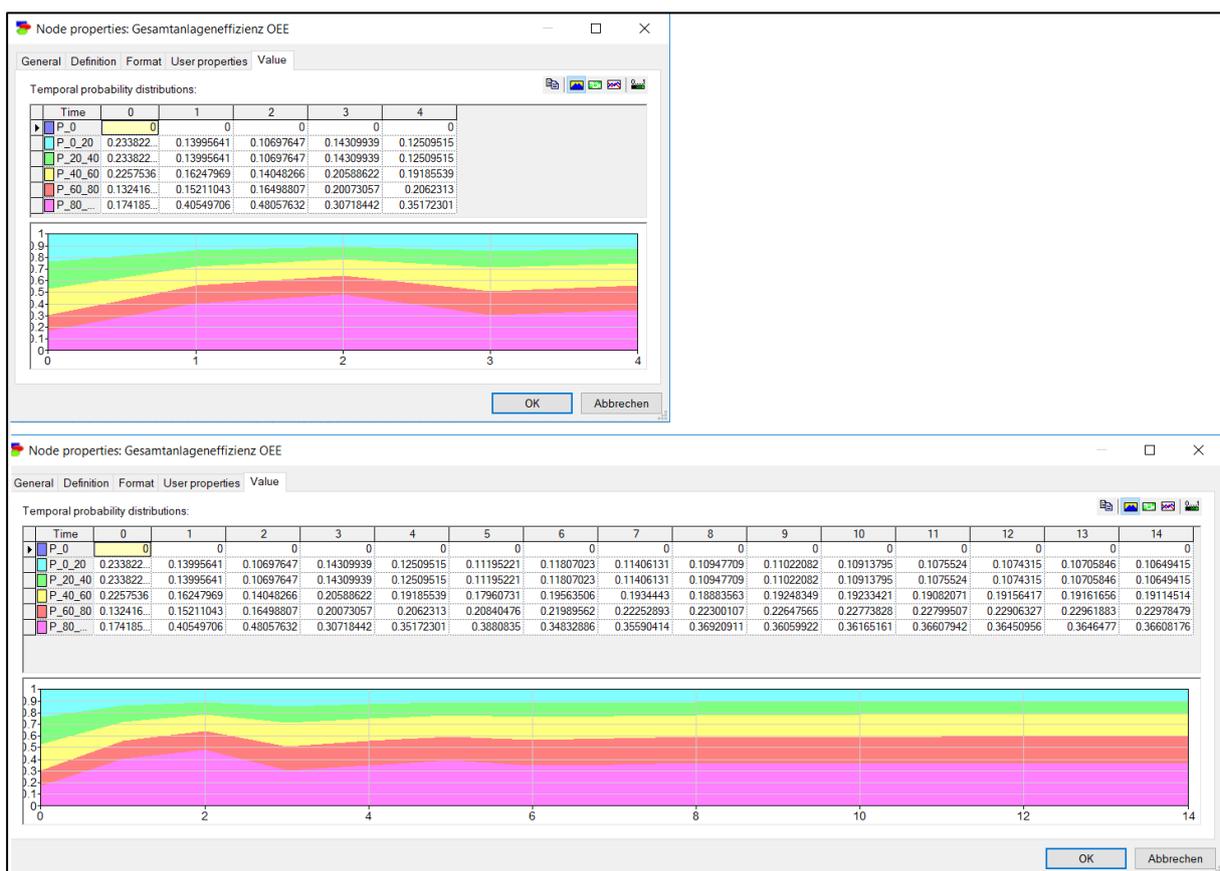


Abbildung 97: Ergebnis durch eine unterschiedliche Anzahl von Zeitintervallen

Durch die Verwendung von mehreren temporalen Pfeilen verschiedener Ordnungen werden für Zukunftsprognosen die Wahrscheinlichkeitswerte der Zustände genauer vorhergesagt. Es wird allerdings sowohl Expertenwissen als auch Erfahrung bei der

Analyse des betrachteten Systems benötigt, um die CPTs beim Vorhandensein mehrerer temporaler Pfeile zu befüllen.

### 4.3.3 Automatische Modellierung des BN

Die automatische Erstellung des BN stößt auf Basis der zugrundeliegenden Daten an ihre Grenzen. Wird die Historienliste direkt zur Erstellung des BN verwendet, bildet der Lernalgorithmus kein Modell und es tauchen zumeist Fehlermeldungen auf. Durch eine Aufbereitung der zugrundeliegenden Datentabelle wird die Erstellung eines Modells über den Lernalgorithmus ermöglicht. Die einfache Struktur des BN liefert allerdings nicht die gewünschten Ergebnisse. Außerdem übernimmt der Lernalgorithmus lediglich die Zelleneinträge der jeweiligen Spalte als Zustände der Knoten.

Die Daten der Historienliste bedürfen einer umfassenden Analyse, bevor an eine automatische Modellierung gedacht werden kann. Diese umfassende Analyse bedeutet unter anderem eine Aufspaltung der Informationen aus der Historienliste auf mehrere Tabellen, welche einen Mehrwert an Informationen bringt. Eine Zusammenführung dieser Tabellen (und damit eine Zusammenführung der neu gewonnenen Informationen) zu einer Gesamttabelle ist auf Grund der unterschiedlichen Strukturen und Informationsinhalte nicht möglich. Diese Gesamttabelle ist allerdings notwendig, um ein BN auf Basis aller Informationen automatisch zu generieren.

## 4.4 Vergleich mit den vorgestellten Modellen

In den Kapiteln 2.4 Stand der Technik und 2.5 Anwendungen werden Modelle vorgestellt, die mit Hilfe von BN instandhaltungsrelevante Themen behandeln. Diese Modelle werden in Kapitel 2.7 über eine SWOT-Analyse umgehend analysiert.

Die Vorteile des in dieser Arbeit erstellten BN gegenüber den zuvor erwähnten Modellen werden in weiterer Folge angeführt.

Das erstellte BN berücksichtigt sowohl die operative Ebene als auch die Managementebene. Während die operative Ebene von den KRIs und den RI/PIs gebildet wird, wird die Managementebene von den RI/PIs und den KPIs repräsentiert. Dies garantiert eine Nutzung von Informationen aus beiden Ebenen. Die Nutzung von verschiedenen KPIs sorgt zudem für ein umfangreiches Ergebnis und eine mehrdimensionale Betrachtung des Produktionsprozesses.

Außerdem wird durch das BN nicht die Wahl der Instandhaltungsstrategie als Ergebnis ausgegeben, sondern die Instandhaltbarkeit und somit die Evaluierung der Möglichkeit einer Instandhaltung bzw. die Aufwandsabschätzung der Instandhaltung berücksichtigt.

Der sich verschlechternde Zustand von Komponenten wird durch die Fehlerzustände und deren Dauer automatisch berücksichtigt. Dadurch verliert das BN auch über die Zeit keine Genauigkeit. Voraussetzung dafür ist ein kontinuierliches Lernen aus den zugrundeliegenden Daten.

SWOT-ANALYSE		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Externe Analyse	Chancen (Opportunities)	Das Modell ermöglicht eine Abbildung und Analyse von komplexen Systemen.	<del>Die Konzentration auf Instandhaltung führt zu einer eindimensionalen Betrachtung, die andere wichtige Kennzahlen in den Hintergrund drängt.</del>
		Durch die Abbildung der kausalen Beziehungen werden ebenenübergreifende Abhängigkeiten im Modell berücksichtigt.	Die Modellierung von stationären Systemen berücksichtigt keine Änderung des betrachteten Systems.
		Die Datenmenge als Grundlage der diskutierten Herangehensweisen ist in ihrer Größe nicht eingeschränkt.	<del>Der sich verschlechternde Zustand von Komponenten ist in einigen Modellen nicht integriert.</del>
		Die Eignung der Anwendung eines BN ist für das Thema Instandhaltung nachgewiesen.	
		Durch die Berücksichtigung der operativen Ebene und der Managementebene und den instandhaltungsrelevanten KPIs ist eine mehrdimensionale Betrachtung gegeben.	
		Die Fehlerzustände und deren Dauer beinhalten den sich verschlechternden Zustand von Komponenten bzw. des Systems.	
		Im Modell ist die Instandhaltbarkeit und somit die Evaluierung der Möglichkeit einer Instandhaltung und deren Aufwandsabschätzung integriert.	
	Gefahren (Threats)	Durch die Methode werden klare Regeln vorgegeben, die bei einer Verwendung gleichbedeutend mit gewissen Beschränkungen sind.	Um eine Lösung für bestimmte Ausnahmesituationen zu generieren, gilt es das Modell noch zu verfeinern.
			Das Modell ist nicht für alle Anwendungsfälle geeignet.
			<del>In den vorhandenen Modellen wird die ideale Instandhaltungsstrategie gesucht, ohne den eigentlichen Instandhaltungsprozess zu behandeln.</del>

Abbildung 98: SWOT-Analyse für das erstellte BN

### 4.5 Ergebnisse in Bezug auf die Problemstellung

Durch die beschriebene Methode wird die Effizienz und Produktivität des Produktionsprozesses verbessert, da mit der Hilfe des DBN, das auf den Daten aus der Vergangenheit beruht, Prognosen für die Zukunft erstellt werden. In weiterer Folge gilt es die notwendige Flexibilität des Produktionsprozesses zu berücksichtigen, um auf sich verändernde Kundenwünsche oder unvorhersehbare Ereignisse eingehen zu können. Dies wird durch die Modellbildung auf Basis eines instationären Produktionsprozesses ermöglicht.

Das erstellte Modell integriert die vorausschauende Instandhaltung in den Produktionsprozess, indem es Zustandsänderungen berücksichtigt und somit notwendige Reparaturen frühzeitig signalisiert. Damit werden ungeplante Ausfälle weitestgehend vermieden und somit nicht nur die Produktivität gesteigert, sondern auch die Produktqualität und die Effektivität des Produktionsprozesses optimiert.

Die umfassende Analyse der Historienliste sorgt für eine erhöhte Informationsvielfalt. Durch die Synthese der Informationen im BN werden diese in ihrer Gesamtheit für Zukunftsprognosen genutzt. Um eine mehrdimensionale Betrachtung auf den Produktionsprozess zu gewährleisten, sind im Modell mehrere KPIs fest verankert.

## 4.6 Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfrage

Zu Beginn dieser Arbeit wird folgende Forschungsfrage gestellt:

*Eignet sich die Modellierung eines stationären Produktionsprozesses durch ein Bayessches Netzwerk für eine zuverlässige Vorhersage im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung mit der Hilfe von KPIs?*

Ein BN eignet sich für die Modellierung eines stationären Produktionsprozesses zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Erweiterung auf ein DBN lässt eine Vorhersage im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung zu, da durch das Hinzufügen einer zeitlichen Komponente eine Relation zwischen Vergangenheit und Zukunft hergestellt wird. Die KPIs berücksichtigen mehrere wichtige Perspektiven im Modell, die eine umfassendere Prozessbetrachtung ermöglichen. Dadurch wird die vorausschauende Instandhaltung im vorhandenen Modell nicht nur auf einen Komponentenausfall reduziert. Es kann auch bei sich verschlechternde KPIs mit instandhaltungsrelevanten Maßnahmen eingegriffen werden. Deshalb lässt sich die Forschungsfrage an dieser Stelle mit einem klaren Ja beantworten.

## 5      **Ausblick**

Das DBN muss mit der Hilfe von Expertenwissen angepasst werden, um die Realität bestmöglich abzubilden und so eine Zukunftsprognose von Instandhaltungsrelevanten Themen für den betrachteten stationären Produktionsprozess zu gewährleisten.

Auf Grund der Datenarmut wurden sämtliche Daten zur Erstellung des Modells verwendet. Für die Validierung des Modells werden zusätzliche Daten benötigt.

Der Aufnahmezeitraum der Daten, auf den das Modell des Produktionsprozesses beruht, ist zu kurz, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Für ein exaktes Ergebnis muss die Grundlage eines kontinuierlichen Lernens aus den Daten des Produktionsprozesses geschaffen werden. Dies erfolgt durch eine automatische Modellanpassung auf Basis der neu aufgenommenen Daten. Kontinuierliches Lernen schafft zudem die Möglichkeit, sich auf einen veränderlichen Produktionsprozess bzw. dessen veränderliche Umwelt einzustellen.

Ein veränderlicher Produktionsprozess wird auch als instationärer Prozess ausgewiesen. Das Modell dieser Arbeit beruht auf einem stationären Produktionsprozess. Durch die steigende Marktvolatilität, die sich hauptsächlich durch die hohen Kundenbedarfschwankungen auszeichnet, wird im Produktionsbereich eine höhere Flexibilität benötigt. Diese wird durch einen instationären Produktionsprozess verwirklicht. Somit gilt es das Modell so zu erweitern, dass es auf der Basis eines instationären Produktionsprozesses beruht.

Die Themen kontinuierliches Lernen und instationärer Produktionsprozess gilt es somit in Zukunft in diese Arbeit zu integrieren.

## 6 Literaturverzeichnis

- Abu-Samah, A. u.a.: Failure Prediction Methodology for Improved Proactive Maintenance using Bayesian Approach, In: 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Band 48, Ausgabe 21, S. 844–851, 2015.
- Adjerid, S. u.a.: Performance Evaluation and Optimisation of Industrial System in a Dynamic Maintenance, In: American Journal of Intelligent Systems, Band 2, Ausgabe 5, S. 82–92, 2012.
- Ansari, F. u.a.: Prescriptive Maintenance of CPPS by Integrating Multi-modal Data with Dynamic Bayesian Networks, 2017.
- Bauernhansl, T. u.a.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- Beierle, C. und Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme, Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.
- Ben Said, A. u.a.: Towards proactive maintenance actions scheduling in the Semiconductor Industry (SI) using Bayesian approach, In: 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016, Band 49, Ausgabe 12, S. 544–549, 2016.
- Bertsche, B. und Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten, 3. Auflage, Berlin, Springer, 2004.
- Birolini, Alessandro: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme: Theorie, Praxis, Management, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Springer, 1988.
- Büyüközkan, G. u.a.: Assessment of Lean Manufacturing Effect on Business Performance Using Bayesian Belief Networks, In: Expert Systems with Applications: An International Journal, Band 42, Ausgabe 19, S. 6539–6551, 2015.
- Cheng, Y. u.a.: Bayesian network based fault diagnosis and maintenance for high-speed train control systems, In: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering, S. 1753–1757, 2013.
- Cigolini, R. D. u.a.: Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management, London, Springer, 2009.
- Colledani, M. und Tolio, T.: Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines, In: CIRP Annals, Band 61, Ausgabe 1, S. 455–458, 2012.

- Danioko, F. u.a.: Dynamic Bayesian Network Approach to improve the Preventive Maintenance of Multi-State Systems, In: 2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology, Band 45, Ausgabe 31, S. 60–65, 2012.
- Dengel, A.: Semantische Technologien, Grundlagen - Konzepte - Anwendungen, Heidelberg, Springer Spektrum, 2012.
- Diederich, H.: Grundlagen wirtschaftlichen Handelns, Wiesbaden, Gabler Verlag, 1993.
- Dienst, S. u.a.: Necessity of using Dynamic Bayesian Networks for feedback analysis into product development, In: 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, S. 939–946, 2010.
- Dienst, S. u.a.: Integrated system for analyzing maintenance records in product improvement, In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Band 76, Ausgabe 1, S. 545–564, 2015.
- Dongiovanni, D. N. und Iesmantas, T.: Failure rate modeling using fault tree analysis and Bayesian network: DEMO pulsed operation turbine study case, In: Fusion Engineering and Design, Reihe : Proceedings of the 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology-12 (ISFNT-12), Band 109–111, S. 613–617, 2016.
- Duta, L.: Bayesian Network for Decision Aid in Maintenance, In: Proceedings of the Romanian Academy, Band 14, Ausgabe 4, S. 387–394, 2012.
- Ebeling, Ch. E.: An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, Boston, McGraw Hill, 1997.
- Gruber, A. u.a.: Condition-Based Maintenance via Simulation and a Targeted Bayesian Network Metamodel, In: Quality Engineering, Band 25, Ausgabe 4, S. 370–384, 2013.
- Hansen, R. C.: Overall Equipment Effectiveness - A Powerful Production / Maintenance Tool for Increased Profits, 1. Auflage, New York, Industrial Press, Inc., 2002.
- Heckerman, David: Bayesian Networks for Data Mining, In: Data Mining and Knowledge Discovery, Band 1, Ausgabe 1, S. 79–119, 1997.
- Jun, H.-B. und Kim, D.: A Bayesian network-based approach for fault analysis, In: Expert Systems with Applications, Band 81, S. 332–348, 2017.
- Kang, C. W. und Golay, M. W.: A Bayesian belief network-based advisory system for operational availability focused diagnosis of complex nuclear power systems, In: Expert Systems with Applications, Band 17, Ausgabe 1, S. 21–32, 1999.
- Kondoh, S. u.a.: Total performance analysis of product life cycle considering the uncertainties in product-use stage, In: Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses, S. 371–376, 2007.

- Koski, T. und Noble, J.: Bayesian Networks: An Introduction, 1. Auflage, Chichester, UK, Wiley, 2009.
- Kraaijeveld, P. und Druzdzel, M.: An interactive generator of diagnostic Bayesian network models, In: 16th International Workshop on Principles of Diagnosis, S. 175–180, 2005.
- Madsen, A. L. u.a.: Applying Object-Oriented Bayesian Networks for Smart Diagnosis and Health Monitoring at both Component and Factory Level, In: Advances in Artificial Intelligence: From Theory to Practice, S. 132–141, 2017.
- Matyas, K.: Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern, 4. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2010.
- Mendes, A. A. u.a.: Establishment of the optimal time interval between periodic inspections for redundant systems, In: Reliability Engineering & System Safety, Band 131, S. 148–165, 2014.
- Meyna, A. und Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren, München, Hanser Fachbuch, 2002.
- Mobley, R. K.: An Introduction to Predictive Maintenance, 2. Auflage, Burlington, Butterworth-Heinemann, 2002.
- Nanjo, K. u.a.: Maintenance Decisions of Part Agent Based on Failure Probability of a Part Using Bayesian Estimation, In: The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Band 29, S. 692–697, 2015.
- Parmenter, D.: Key Performance Indicators (KPI): Developing, Implementing, and Using Winning KPIs, New Jersey, John Wiley & Sons, 2010.
- Pearl, Judea: Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems, Networks of Plausible Inference, San Francisco, Morgan Kaufmann, 1988.
- Preißler, P. R.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle, München, De Gruyter Oldenbourg, 2008.
- Rausand, M. und Yland, A. H.: System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, 2. Auflage, Hoboken, NJ, Wiley Series in Probability and Statistics, 2004.
- Reichel, J. u.a.: Betriebliche Instandhaltung, Berlin, Springer, 2009.
- Ruschel, E. u.a.: Mining Shop-Floor Data for Preventive Maintenance Management: Integrating Probabilistic and Predictive Models, In: 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, S. 1127–1134, 2017.
- Salvendy, G.: Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management, 3. Auflage, New York, John Wiley & Sons, 2001.

- Sand, K. u.a.: Application of Bayesian Networks for maintenance and risk modelling, In: IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, S. 530–535, 2010.
- Stamatis, D. H.: The OEE Primer: Understanding Overall Equipment Effectiveness, Reliability, and Maintainability, 1. Auflage, Boca Raton, Taylor & Francis Inc, 2010.
- Tobon-Mejia, D. A. u.a.: CNC machine tool's wear diagnostic and prognostic by using dynamic Bayesian networks, In: Mechanical Systems and Signal Processing, Reihe Interdisciplinary and Integration Aspects in Structural Health Monitoring, Band 28, S. 167–182, 2012.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4001, Blatt 2 - Grundbegriffe zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit, 1986.
- Weber, P. u.a.: Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas, In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, Reihe Special Section: Dependable System Modelling and Analysis, Band 25, Ausgabe 4, S. 671–682, 2012.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundmaßnahmen der Instandhaltung .....	3
Abbildung 2: Instandhaltungskosten in Abhängigkeit der Instandhaltungsintensität ..	5
Abbildung 3: Instandhaltungsstrategie im Dreiecksverhältnis .....	5
Abbildung 4: Instandhaltungsstrategien .....	6
Abbildung 5: Die vier Arten der Leistungsmessung .....	8
Abbildung 6: Die Zustandsvariable und Lebensdauer einer Komponente .....	10
Abbildung 7: Ausfallzeiten und Histogramm der Ausfallhäufigkeiten a.) Ausfallzeiten; b.) geordnete Ausfallzeiten; c.) Histogramm der Ausfallhäufigkeiten .....	10
Abbildung 8: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und Dichtefunktion $f(t)$ .....	11
Abbildung 9: Die Verteilungsfunktion $F(t)$ und die Dichtefunktion $f(t)$ .....	11
Abbildung 10: Die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ .....	12
Abbildung 11: Ausfallwahrscheinlichkeit / Überlebenswahrscheinlichkeit .....	12
Abbildung 12: Punktverfügbarkeit $A(t)$ und Dauerverfügbarkeit $A_D$ .....	18
Abbildung 13: Brutto- bzw. Netto-Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad .....	21
Abbildung 14: Berechnung der OEE laut Hansen .....	22
Abbildung 15: Beispiel für ein BN .....	22
Abbildung 16: Die drei Schritte zur Erstellung eines BN.....	24
Abbildung 17: Arbeitsablauf zur Erstellung eines BN .....	25
Abbildung 18: Anwendungsbeispiel eines OOBN (Blockheizungssystem) .....	26
Abbildung 19: Forschungsarbeiten zum Thema instandhaltungsrelevanter BN .....	27
Abbildung 20: Die vier Reifegrade der wissensbasierten Instandhaltung .....	28
Abbildung 21: Das Modell PriMa .....	29
Abbildung 22: Methode zur RAM-Optimierung .....	30
Abbildung 23: Der kausale Plan .....	31
Abbildung 24: Der Bayessche Plan .....	32
Abbildung 25: Der Komponentenmanager (part agent) .....	33
Abbildung 26: Die Lebenszykluserweiterung .....	33
Abbildung 27: Methodik zur Fehlerentdeckung vor ihrem Auftritt .....	34
Abbildung 28: Das Modell zur Unterstützung des Instandhaltungsmanagements ....	36
Abbildung 29: Fallbeispiel, der Produktionsprozess .....	40
Abbildung 30: Prozessschritte V2.....	41
Abbildung 31: SWOT-Analyse zur Stand der Technik und Anwendungen .....	43
Abbildung 32: Flussdiagramm für die Erstellung des BN.....	44
Abbildung 33: Überprüfung der Eignung der Spalte Value ID als Primärschlüssel....	50
Abbildung 34: Überprüfung der Eignung der Spalte Value als Primärschlüssel .....	51
Abbildung 35: Einführung der Zustand-ID zur eindeutigen Identifizierung.....	51
Abbildung 36: Aufspaltung der Historienliste .....	52
Abbildung 37: Anzahl der Auftritte eines Maschinenzustandes .....	54
Abbildung 38: Berechnung der Dauer eines Maschinenzustandes .....	54

Abbildung 39: Berechnung der Gesamtdauer eines Maschinenzustandes .....	55
Abbildung 40: Mittlere Dauer pro Auftritt eines Maschinenzustandes.....	55
Abbildung 41: Anzahl der Auftritte eines Fehlerzustandes .....	57
Abbildung 42: Berechnung der Dauer eines Fehlerzustandes.....	57
Abbildung 43: Berechnung der Gesamtdauer eines Fehlerzustandes.....	58
Abbildung 44: Mittlere Dauer pro Auftritt eines Fehlerzustandes.....	58
Abbildung 45: KPIs als Knoten des BN .....	62
Abbildung 46: Knoten auf Basis der Daten des Produktionsprozesses .....	62
Abbildung 47: Knoten der Zwischenebene .....	63
Abbildung 48: Herstellung der kausalen Beziehungen .....	63
Abbildung 49: Berücksichtigung von MDT und SDT .....	65
Abbildung 50: Vereinfachtes Modell als Grundlage für das BN .....	65
Abbildung 51: Die Kennzahlenarten als Modellebenen .....	66
Abbildung 52: Die Knoten mit ihren einzelnen Zuständen .....	67
Abbildung 53: Die CPT einzelner Knoten des Modells .....	68
Abbildung 54: Variantenvergleich zur Aufwandserklärung .....	69
Abbildung 55: Zuweisung der Fehlerzustände M2.....	70
Abbildung 56: Visualisierte Zustände der KRI-Ebene.....	72
Abbildung 57: Berechnung der MTTF der Zustandskombinationen.....	74
Abbildung 58: Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustandskombinationen .....	75
Abbildung 59: Die mittlere Instandsetzungsdauer der Fehlerzustandskategorien .....	77
Abbildung 60: Die mittlere Wartungsdauer der Fehlerzustandskategorien .....	81
Abbildung 61: Berechnung der Dauer einer Stückzahlaufzeichnung.....	83
Abbildung 62: Berechnung der Arbeitszeit (B).....	83
Abbildung 63: Berechnung der Betriebsmittelzeiten .....	84
Abbildung 64: Visualisierte Zustände der RI/PI-Ebene.....	93
Abbildung 65: Die innere Dauerverfügbarkeit der Zustandskombinationen .....	94
Abbildung 66: Berechnung der Zelleneinträge der CPT .....	95
Abbildung 67: Erklärung der Berechnungsformel für die CPT-Zellen .....	95
Abbildung 68: Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zustandskombinationen .....	96
Abbildung 69: Berechnung der operativen Dauerverfügbarkeit .....	98
Abbildung 70: Berechnung der Instandhaltbarkeit der Zustände des Elternknoten .	102
Abbildung 71: Zustandswahrscheinlichkeit der Zuverlässigkeit.....	106
Abbildung 72: Visualisierte Zustände der KPI-Ebene .....	107
Abbildung 73: Die Zeittafel des DBN .....	108
Abbildung 74: Temporaler Pfeil zwischen zwei Knoten .....	109
Abbildung 75: Temporaler Pfeil eines Knotens.....	109
Abbildung 76: CPTs bei unterschiedlichen Zeitintervallen .....	110
Abbildung 77: Berücksichtigung der temporalen Pfeile .....	110
Abbildung 78: Befüllung der CPT mit Ordnung 1 .....	111
Abbildung 79: Das manuell modellierte DBN mit Ordnung 1 .....	111

---

Abbildung 80: Wahrscheinlichkeiten des OEE-Knotens durch Ordnung 1 .....	112
Abbildung 81: Befüllung der CPT mit Ordnung 1 und 2 .....	112
Abbildung 82: Das manuell erstellte DBN mit Ordnung 1 und 2 .....	113
Abbildung 83: Wahrscheinlichkeiten des OEE-Knotens durch Ordnung 1 und 2.....	113
Abbildung 84: Die Historienliste in GeNIe.....	114
Abbildung 85: Automatische Modellierung mit "Bayesian Search" .....	114
Abbildung 86: Automatische Modellierung durch einen Lernalgorithmus .....	115
Abbildung 87: Das automatisch generierte Modell .....	115
Abbildung 88: Diskretisierung der Spalte "ID" .....	118
Abbildung 89: Die Tabelle "MaschFehler" für die automatische BN-Modellierung...	118
Abbildung 90: Automatische BN-Modellierung durch „MaschFehler“ .....	120
Abbildung 91: Vorgabe der kausalen Beziehungen.....	120
Abbildung 92: Automatisch erstelltes BN.....	121
Abbildung 93: Setzen von Zustandes im automatisch erstellten BN.....	122
Abbildung 94: Vergleichsübersicht der beiden Modelle .....	125
Abbildung 95: Setzen einer hohen operativen Dauerverfügbarkeit.....	130
Abbildung 96: Setzen des Zustandes kein Fehler beim Fehlerstatus M4 .....	130
Abbildung 97: Ergebnis durch eine unterschiedliche Anzahl von Zeitintervallen .....	131
Abbildung 98: SWOT-Analyse für das erstellte BN.....	133

## 8 Formelverzeichnis

Formel 1: Definition der Zustandsvariable .....	9
Formel 2: Die Verteilungsfunktion $F(t)$ .....	11
Formel 3: Die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ .....	12
Formel 4: Die Ausfallwahrscheinlichkeit für ein Intervall .....	13
Formel 5: Die Ausfallwahrscheinlichkeit für ein Intervall (funktionsfähig) .....	13
Formel 6: Die Ausfallrate .....	13
Formel 7: Die Ausfallrate bestehend aus Dichte- und Zuverlässigkeitsfunktion .....	13
Formel 8: Berechnung der MTTF .....	13
Formel 9: Mittlere Anzahl an Ausfällen einer Betrachtungseinheit.....	14
Formel 10: Mittlere totale Reparaturzeit einer Betrachtungseinheit .....	14
Formel 11: Mittelwert der Reparaturzeit einer Betrachtungseinheit .....	14
Formel 12: Mittelwert der Reparaturzeit einer Betrachtungszeit über die Ausfallrate .....	14
Formel 13: Strukturfunktion der Serienstruktur .....	15
Formel 14: Strukturfunktion der Serienstruktur für unabhängige Zustandsvariablen .....	15
Formel 15: Definition der Produktivität .....	16
Formel 16: Zuverlässigkeit einer Komponente .....	16
Formel 17: Zuverlässigkeit eines Systems .....	17
Formel 18: Definition der Instandhaltbarkeit .....	17
Formel 19: Instandhaltbarkeit für eine Exponentialverteilung der Reparaturzeit .....	17
Formel 20: Definition der Punktverfügbarkeit.....	18
Formel 21: Allgemeine Definition der Dauerverfügbarkeit .....	19
Formel 22: Innere Dauerverfügbarkeit .....	19
Formel 23: Operative Dauerverfügbarkeit .....	19
Formel 24: Operative Nichtverfügbarkeit laut Rausand .....	19
Formel 25: Operative Dauerverfügbarkeit laut Rausand .....	20
Formel 26: Systemverfügbarkeit.....	20
Formel 27: Gesamtanlageneffizienz OEE .....	20
Formel 28: Gesamte gemeinsame Verteilungsfunktion .....	23
Formel 29: Anwendung der Verteilungsfunktion .....	23
Formel 30: Spaltenanzahl einer CPT .....	68
Formel 31: Berechnung der Spaltenanzahl der MTTF-CPT .....	73
Formel 32: Berechnung der Spaltenanzahl der MTTR-CPT .....	77
Formel 33: Berechnung der Spaltenanzahl der MTPM-CPT .....	80
Formel 34: Berechnung der Spaltenanzahl der inneren Dauerverfügbarkeit-CPT.....	94
Formel 35: Berechnung der Spaltenanzahl der op. Dauerverfügbarkeit-CPT.....	98

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Grundmaßnahmen.....	4
Tabelle 2: Anwendungsfelder der einzelnen Instandhaltungsstrategien .....	7
Tabelle 3: Betriebszeiten zur Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgradberechnung ..	21
Tabelle 4: Berechnung von Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad.....	21
Tabelle 5: Auszug aus der Historie des Produktionsprozesses.....	46
Tabelle 6: Mögliche Maschinenzustände im Produktionsprozess.....	47
Tabelle 7: Definition der Fehlerzustände M1 .....	48
Tabelle 8: Definition der Fehlerzustände M2 .....	48
Tabelle 9: Definition der Fehlerzustände M3 .....	49
Tabelle 10: Definition der Fehlerzustände M4 .....	49
Tabelle 11: Definition der Fehlerzustände M5 .....	49
Tabelle 12: Exemplarische Zeile der Historienliste zur Primärschlüsselüberprüfung.	50
Tabelle 13: Auszug aus der Liste der Maschinenzustände .....	53
Tabelle 14: Maschinenzustände des Produktionsprozesses .....	56
Tabelle 15: Auszug aus einer Liste der Fehlerzustände M2.....	56
Tabelle 16: Analyse der Fehlerzustände M1 des Produktionsprozesses V2 .....	59
Tabelle 17: Analyse der Fehlerzustände M2 des Produktionsprozesses V2 .....	59
Tabelle 18: Analyse der Fehlerzustände M3 des Produktionsprozesses V2 .....	60
Tabelle 19: Analyse der Fehlerzustände M4 des Produktionsprozesses V2 .....	60
Tabelle 20: Analyse der Fehlerzustände M5 des Produktionsprozesses V2 .....	61
Tabelle 21: Produzierte Stückzahl im Produktionsprozess V2.....	61
Tabelle 22: Kausale Beziehungen der Managementebene .....	64
Tabelle 23: Kausale Beziehungen der operativen Ebene.....	64
Tabelle 24: Zustände der Knoten des BN.....	67
Tabelle 25: Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte des Maschinenzustandes....	69
Tabelle 26: Zusammensetzung der Gesamtdauer des Zustandes "Fehler".....	71
Tabelle 27: Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte des Fehlerzustandes M2 .....	71
Tabelle 28: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KRI-Ebene.....	71
Tabelle 29: Die MTTF Ergebnisse und die transponierte CPT .....	74
Tabelle 30: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTF Knotenpunktes .....	76
Tabelle 31: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTF Knotenpunktes.....	76
Tabelle 32: Die MTTR Ergebnisse und die transponierte CPT .....	78
Tabelle 33: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTR Knotenpunktes....	79
Tabelle 34: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTR Knotenpunktes .....	79
Tabelle 35: Die MTTPM Ergebnisse und die transponierte CPT .....	81
Tabelle 36: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des MTTPM Knotenpunktes..	82
Tabelle 37: Die Wahrscheinlichkeit der Zustände des MTTPM Knotenpunktes .....	82
Tabelle 38: Nutzungs-, Leistungs- und Qualitätsgrad der Elternknoten.....	84
Tabelle 39: Die Netto-Nutzungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (I).....	85

Tabelle 40: Die Netto-Nutzungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (II).....	86
Tabelle 41: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrades (I) .....	87
Tabelle 42: Zustandskombinationswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrades (II) .....	88
Tabelle 43: Zustandswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrad Knotenpunktes (I) .....	88
Tabelle 44: Zustandswahrscheinlichkeit des Nutzungsgrad Knotenpunktes (II) .....	89
Tabelle 45: Die Leistungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (I) .....	89
Tabelle 46: Die Leistungsgrad Ergebnisse und die transponierte CPT (II) .....	90
Tabelle 47: Zustandswahrscheinlichkeit des Leistungsgrad Knotenpunktes (I).....	91
Tabelle 48: Zustandswahrscheinlichkeit des Leistungsgrad Knotenpunktes (II).....	92
Tabelle 49: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der RI/PI-Ebene.....	92
Tabelle 50: Zustände der RI/PI-Knoten und ihre Bereiche .....	93
Tabelle 51: Min. und max. innere Dauerverfügbarkeit und die transponierte CPT ....	96
Tabelle 52: Zustandskombinationen der inneren Dauerverfügbarkeit .....	97
Tabelle 53: Zustandswahrscheinlichkeiten der inneren Dauerverfügbarkeit.....	97
Tabelle 54: Min. und max. op. Dauerverfügbarkeit und die transponierte CPT .....	99
Tabelle 55: Zustandskombinationen der operativen Dauerverfügbarkeit.....	100
Tabelle 56: Zustandswahrscheinlichkeit der operativen Dauerverfügbarkeit .....	101
Tabelle 57: Min. und max. Instandhaltbarkeit und die transponierte CPT .....	102
Tabelle 58: Zustandswahrscheinlichkeit der Instandhaltbarkeit.....	102
Tabelle 59: Min. und max. OEE und die transponierte CPT .....	103
Tabelle 60: Zustandskombinationen der OEE .....	104
Tabelle 61: Zustandswahrscheinlichkeit der OEE .....	105
Tabelle 62: Wahrscheinlichkeitswerte für die Knoten der KPI-Ebene.....	106

## 10 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	meaning
BN	Bayessches Netzwerk	Bayesian Network
bzw.	beziehungsweise	
CEO	geschäftsführende Vorstandsmitglied	Chief Executive Officer
CNC	Computerisierte numerische Steuerung	Computerized Numerical Control
CPT	bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle	conditional probability table
d.h.	das heißt	
DAG	gerichteter azyklischer Graph	directed acyclic graph
DB	Datenbank	database
DBN	dynamisches Bayessches Netzwerk	dynamic Bayesian Network
DIN	Deutsche Industrienorm	
I.	Instandsetzung	
ID	Identifikation	Identification
KPI	wichtige Leistungskennzahl	Key Performance Indicator
KRI	wichtige Ergebniskennzahl	Key Result Indicator
max.	maximal	maximum
MDT	Instandhaltungswartezeit	Maintenance Delay Time
min.	minimal	minimum
MTTF	Mittelwert der ausfallfreien Zeit	Mean Time To Failure
MTTF <sub>i</sub>	Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit	
MTTPM	mittlere Wartungsdauer	Mean Time To Preventive Maintenance
MTTR	Mittlere Instandsetzungsdauer / Reparaturzeit	Mean Time To Repair
MTTR <sub>i</sub>	Mittlere Reparaturzeit eines Elements	
MTTR <sub>s</sub>	Mittlere Reparaturzeit des gesamten Systems	
ODBC	offene Datenbankverbindung	Open Database Connectivity
OEE	Gesamtanlageneffizienz	Overall Equipment Efficiency
OLTC	Laststufenschalter	On Load Tap Changer
OOBN	objektorientiertes Bayessches Netzwerk	object-oriented Bayesian Network
PI	Leistungskennzahl	Performance Indicator
RAM	Verfügbarkeit-Zuverlässigkeit-Instandhaltbarkeit	reliability-availability-maintainability
RI	Ergebniskennzahl	Result Indicator
RI/PI	Ergebniskennzahl / Leistungskennzahl	Result Indicator / Performance Indicator
SDT	logistische Wartezeit	Supply Delay Time
SWOT	Stärken-Schwächen-Chancen-Gefahren	Strength-Weaknesses-Opportunities-Threats
TBNL	gezielter Bayessches Netzwerk Lernalgorithmus	targeted Bayesian Network learning algorithm
TPI	Gesamtleistungsindex	Total Performance Index
u.a.	und andere	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	
vgl.	vergleiche	
W.	Wartung	
z.B.	zum Beispiel	