

---

# Analyse von Maschinendaten zur Entscheidungsunterstützung bei der Produktverbesserung durch die Anwendung eines Feedback Assistenz Systems

genehmigte DISSERTATION  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von  
Dipl.-Wirt. Inform. Susanne Dienst

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen  
Siegen 2014

---

- 
1. **Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Madjid Fathi
  2. **Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard

Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2014

*gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreien Papier*

---

---

## Danksagung

Mein Dank gilt meinen Eltern.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Madjid Fathi, der mir die Möglichkeit bot, die vorliegende Arbeit an seinem Institut für Wissensbasierte Systeme und Wissensmanagement der Universität Siegen anfertigen zu können.

Mein Dank gilt ebenso dem Zweitgutachter dieser Arbeit, Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard für seine Unterstützung und die hilfreichen Kommentare zur Umsetzung des „roten Fadens“ in der Arbeit.

Auch bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen am Institut. Hier gilt mein besonderer Dank Herrn Dipl.-Wirt. Inform. Patrick Uhr und Herrn M.Sc. Fazel Ansari für die gute Zusammenarbeit über den gesamten Zeitraum der Erstellung meiner Dissertation. Für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen, für das Korrektur lesen und auch die Motivation, die ich durch sie erhalten habe.

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen des DFG-Projektes: „*Erweiterung des Product Lifecycle Managements durch wissensbasierte Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung (WiRPro)*“ und wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert, wofür ich mich bedanke. Zudem danke ich meinen Projektpartnern des DFG-Projekts *WiRPro* für die sehr erfolgreiche Kooperation, vor allen Herrn Dipl.-Ing. Andreas Lindner für den offenen und hilfreichen Austausch.

---

---

---

## Abstrakt

Der technologische Fortschritt führt dazu, dass immer mehr Daten erzeugt und verwaltet werden. Dieser Trend lässt sich auch im Kontext des Produktlebenszyklus beobachten. Hier werden während der Nutzungsphase in der Umgebung und am Produkt selbst mit steigender Tendenz Daten mittels Sensoren automatisch erfasst. Aber auch manuell werden durch Betreiber oder Servicemitarbeiter immer mehr Daten in Informationssysteme eingegeben. Diese Daten werden für einen spezifischen Verwendungszweck, wie die Abrechnung von Dienstleistungen genutzt und anschließend archiviert. Dabei kann aus diesen Daten über ihren eigentlichen Verwendungszweck hinaus Wissen zur Verbesserung von Produkten generiert werden, wofür die Basis in der Produktentwicklung gelegt wird.

Eine erfolgreiche Produktentwicklung führt zu qualitativ hochwertigen Gütern und zufriedenen Kunden und damit zu hohen Verkaufszahlen der Güter, was den Unternehmenserfolg auf dem Markt ausmacht. Daher ist die Verbesserung der Produktentwicklung immer wieder Gegenstand der Forschung. Aktuell werden hierzu im Produktlebenszyklus der Produktentwicklung nachgelagerte Phasen, speziell die Nutzungsphase kaum betrachtet. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher einen Wissenstransfer zu realisieren, in dem aus den Produktnutzungsdaten anwendbares Wissen in die Produktentwicklung zurückgeführt wird. Der Fokus liegt dabei auf Industriegütern, bei denen die Feedbackdaten strukturiert in verschiedenen Datenquellen vorliegen und ein enger Kontakt zwischen Kunden und Herstellern gegeben ist.

Zur Verwaltung und Analyse der Daten wird ein Feedback Assistenz System (FAS) konzipiert und entwickelt. Hier werden die Daten aus den verschiedenen Quellen hin transferiert und in ein einheitliches Datenbankschema übertragen. Auf diese zentrale Datenbasis lassen sich wissensbasierte Methoden anwenden u.a. aus dem Bereich des Data Mining. Diese assistieren dem Produktentwickler bei der Verbesserung bestehender Produktgenerationen. Die erfassten und umfangreichen Datenmengen werden verdichtet und Muster werden aufgedeckt, die der Bereitstellung von entscheidungsrelevantem und intuitiv verständlichem Wissen für den Produktentwickler dienen. Im Rahmen der Produktverbesserung sind hierzu explizit drei Bereiche identifiziert worden, in denen die Feedbackdaten erfolgsbringend eingesetzt werden können: die Überprüfung der Kundenanforderungen, die Fehlerdiagnose und die Bewertung von Verbesserungsalternativen. Mittels der Feedbackdaten werden Kosten- und Zeitindikatoren aufgestellt und berechnet zur Überprüfung der Kundenanforderungen mit dem Ziel bei nicht erfüllten Produktverbesserungsprozess auszulösen. Sodann wird während der Analysephase der Produktverbesserung eine Methode zur Diagnose von Schwachstellen und Fehlerursachen entwickelt und angewandt. Ziel ist hier die Aufdeckung von Verbesserungspotentialen und somit die Senkung der Fehleranfälligkeit von Produkten. Zur Verbesserung des Produktes stehen dem Produktentwickler eine Vielzahl von Alternativen zur Verfügung, die bewertet werden müssen, nach den Zielsetzungen aus der Produktentwicklung und/oder mittels der Feedbackdaten. Hierzu ist eine Methode aus der multikriteriellen Entscheidungstheorie konzipiert und umgesetzt worden.

---

## Abstract

Technological progress leads to an increasing number of generated and managed data. This trend can also be observed in the context of the product life cycle. During the use phase data are collected from the product automatically, with increasing tendency, by means of on-site, embedded or mounted sensors. In addition, the operator or service staffs insert substantial data into information systems. The accumulated data are used for specific purposes, such as billing of services, and afterwards are archived in the repositories. Knowledge can be generated from the collected data with the intention to support development and especially improvement of the product.

A successful product development leads to high-quality goods and customer satisfaction which ultimately influences on the company's success in the market with large scale sales of goods. Hence, the product development is consistently a subject of research. Currently in the product life cycle, the subsequent phases, especially the use phase is not considered. The aim of this work is to realize a knowledge transfer where applicable knowledge from the product use data is fed back into product development. The focus is on industrial goods, where the feedback data are structured in multiple data sources, and also manufacturers and customers are in close contacts.

For the management and analysis of data, a feedback assistance system (FAS), is designed and developed. Here the data from different sources are transferred into a unified database. On this data layer, knowledge-based methods can be applied i.e. from the field of data-mining. These methods should assist product developers in the improvement of existing product generations. The captured, extensive amounts of data are, therefore, condensed, and patterns are detected. As a result, the FAS provide the product developer with decision-relevant and intuitively understandable knowledge. In the scope of product improvement, important is to determine the areas in which the feedback data can be used successfully. So for the FAS, a combination of methods for three main applications will be integrated (1) verification of customer requirements, (2) fault diagnosis, and (3) evaluation of improvement potential. Cost and time indicators are deployed for the verification of requirements which consequently reveal the non-achieved objectives of the product improvement process. So the diagnosis should be applied to detect weak points and failure causes as improvement potential such as reduction of the error rate. To eliminate the existing weaknesses and deficiencies, the product developers should evaluate a variety of alternatives according to the objectives of the product development on the basis of the feedback data. For this purpose, a method from the multi-criteria decision theory is implemented.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Die Produktverbesserung als Variante der Produktneuentwicklung	5
2.1.1	Produktentwicklung	6
2.1.2	Produktverbesserung	9
2.1.3	Aktuelle Forschungstrends	11
2.2	Daten – Informationen – Wissen	16
2.3	Feedbackdaten	17
2.3.1	Instandhaltung	19
2.3.2	Condition Monitoring	21
2.4	Wissensgenerierung auf Basis der Feedbackdaten	23
<b>3</b>	<b>Entwurf des Feedback Assistenz Systems</b>	<b>29</b>
3.1	Anwendungsfälle des FAS	29
3.2	Festlegung der Systemarchitektur	35
<b>4</b>	<b>Industriegüter</b>	<b>38</b>
4.1	Anforderungen an Produktklassen für das FAS	39
4.2	Ausgewählte Produkte	40
4.2.1	Hydraulische Strömungsmaschinen	40
4.2.2	Blockheizkraftwerk	45
<b>5</b>	<b>Feedbackdatenübertragung und Verwaltung</b>	<b>47</b>
5.1	Auswahl eines Open Source Data Warehouses	49
5.1.1	Anforderungen	49
5.1.2	Gegenüberstellung der DWH-Systeme	52
5.1.3	Pentaho	55
5.2	Umsetzung	56
5.2.1	Datenmanagement	57
5.2.2	Übertragung der Feedbackdaten in die DB	58
5.3	Erfassung der Instandhaltungsdaten	59
5.3.1	Entwurf eines mobilen Instandhaltungstools	60

---

5.3.2	Implementation des Konzeptes.....	63
5.3.3	Performance der Instandhaltungssoftware.....	64
<b>6</b>	<b>Wissensbasierte Methodenkombination .....</b>	<b>67</b>
6.1	Auslösen der Produktverbesserung .....	67
6.1.1	Aufstellen der Kennzahlen .....	69
6.1.2	Umsetzung .....	72
6.2	Aufdeckung von Schwachstellen.....	77
6.2.1	Bayes'sche Netze .....	77
6.2.2	Erstellung von BN .....	81
6.2.3	BN am Beispiel der hydraulischen Strömungsmaschinen .....	84
6.2.4	Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Feedbackdaten.....	86
6.3	Erweiterungen der Bayes'schen Netze .....	89
6.4	Entscheidungsunterstützung bei der Verbesserung.....	96
6.4.1	Zielsetzung aus der Produktentwicklung .....	101
6.4.2	Verbesserungsalternativen.....	104
6.4.3	Multikriterielle Entscheidungsverfahren.....	105
6.4.4	Realisierung des Entscheidungsunterstützung Moduls.....	109
6.4.5	Umsetzung des Entscheidungsunterstützung Moduls .....	114
6.4.6	Prognose .....	116
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>120</b>
7.1	Fazit.....	120
7.2	Ausblick .....	122
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>124</b>
8.1	Abbildungen.....	124
8.2	Tabellen .....	126
8.3	Formeln.....	127
8.4	Literaturverzeichnis .....	128
8.5	Eigene Publikationen im Rahmen dieser Arbeit.....	145



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der Globalisierung und des steigenden Konkurrenzdruckes gibt es eine hohe Motivation von Unternehmen, sich Wettbewerbsvorteile in der Produktentwicklung zu sichern, um sich langfristig und erfolgreich auf dem Markt zu halten. Dabei werden an heutige Industriegüter höchste Qualitätsanforderungen in Bezug auf lange Laufzeiten und eine geringe Fehleranfälligkeit gestellt. Diese Anforderungen müssen in der Produktentwicklung realisiert werden, um ein erfolgreiches Produkt auf den Markt zu bringen, sodass der Kunde zufrieden ist und auch in Zukunft das Produkt kauft. Um dies zu erreichen, wird ein Transfer angestoßen, in dessen Verlauf die Daten aus der Produktnutzung zur Anwendung in der Produktentwicklung in Wissen transferiert werden.

Der Forschungsschwerpunkt, Wissen in die Produktentwicklung zu integrieren, ist aktuell und relevant, denn durch diese Integration können Entwicklungszeiten verkürzt und Kosten gesenkt werden. Zugleich wird eine Steigerung der Qualität erreicht. Durch den technologischen Fortschritt in der Informatik haben sich die Methoden und Verfahren der Datenhaltung und -verarbeitung enorm verbessert, sodass sich das zur Verfügung stehende Datenvolumen immer weiter vergrößert. Dazu gehören auch die im Lebenszyklus eines Produktes erzeugten Daten. Die Nutzungsphase ist die längste in der Lebensdauer eines Produktes. In dieser werden auch die meisten Daten erzeugt, beispielsweise Instandhaltungs- oder Betriebsdaten. Diese werden derzeit nur für spezifische Einsatzzwecke erstellt, verwendet und anschließend archiviert. Aber über den eigentlichen Verwendungszweck hinaus kann aus diesen Daten Wissen generiert werden, um den Produktentwickler zu unterstützen bzw. ihm bei den zu treffenden Entscheidungen für die Verbesserung der nächsten Generation zu assistieren. Diese Daten werden derzeit nicht systematisch zurückgeführt, da eine Auswertung aufgrund fehlender Methoden und Werkzeuge in der Produktverbesserung nicht möglich ist.

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung eines Feedback Assistenz Systems (FAS) zur prozessübergreifenden Verwaltung und Verarbeitung von Produktnutzungsdaten und zur Repräsentation von entscheidungsrelevantem Wissen zur Verbesserung der nächsten Produktgeneration. Hierbei kann das Wissen einmal angewandt werden um eine konkrete Produktegeneration zu verbessern, es wird aber auch möglich sein Komponenten produktunabhängig zu verbessern. Durch die Anwendung der Feedbackanalyse können so bei Standardkomponenten Rückschlüsse gezogen werden wie, das eine bestimmte Dichtung nicht geeignet ist bei hoher Temperatur, dabei ist es egal bei welcher Produktgeneration sie verbaut wird.

Der Fokus liegt dabei auf strukturierten Daten (numerische oder boolesche Daten) die während der Nutzung erzeugt werden und frei von subjektiven Meinungen (z.B. von Kunden) sind. Strukturierte Daten können vom Produkt (z.B. durch Condition Monitoring (CM) Methoden) oder über das Produkt (z.B. Betriebsdatenerfassung, Servicemitarbeiter) aufgenommen werden. Durch den Fortschritt und die sinkenden Kosten im Mikro-

Engineering Bereich werden Sensoren immer kostengünstiger hergestellt (Reichel et al., 2009) und finden damit immer häufiger Verwendung in der Überwachung des Maschinenverhaltens und so zur Vermeidung von ungeplanten und längeren Stillstandzeiten. Das hat zur Folge, dass immer mehr strukturierte Sensordaten erzeugt werden, die zurückgeführt werden können. Aktuell werden die Daten in diversen Datenbanken bei den Betreibern verwaltet. Zu definierten Zeitpunkten der Produktnutzung werden Daten aus dem Betrieb, z.B. für das Qualitätsmanagement, die Leistungsbewertung oder das Kostenmanagement, erhoben, aber nur punktuell verwendet (Seliger et al., 2010).

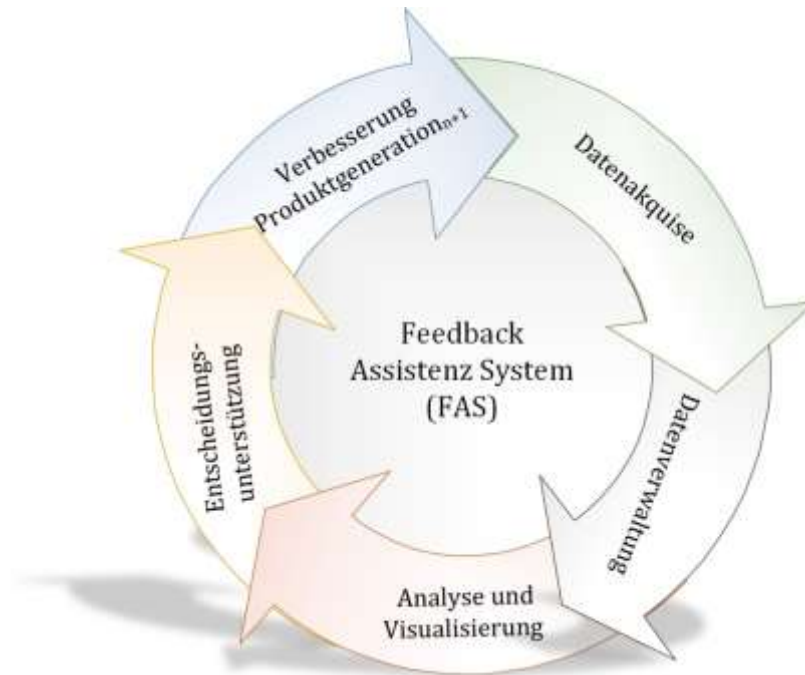
Eine Integration der erfassten Daten in die bestehenden Datenbanken der Produktentwicklung, z.B. des Product Lifecycle Managements (PLM), in dem vor allem Produktstammdaten verwaltet werden, findet derzeit nicht statt. Hemmnisse sind hierbei der fehlende Rückführungsprozess für Feedbackdaten, sowie derzeitige Datenbankmodelle, die auf Produkttypen ausgelegt sind und weder Produktinstanzen noch dazugehörige Produktnutzungsdaten verwalten können. Die vorliegende Arbeit zeigt die Realisation eines Wissenstransfers von Feedbackdaten aus der Nutzung in die Produktentwicklung. In zahlreichen Industrieinterviews und nach einer ausgiebigen Literaturrecherche hat sich gezeigt, dass die Feedbackdaten dazu eingesetzt werden können:

- bestehende Anforderung, die ein Kunde an die Leistungsfähigkeit eines Produktes stellt, zu überprüfen
- Schwachstellen bzw. Fehlerursachen zu ermitteln und
- Entscheidungen in der Produktverbesserung zu unterstützen.

Die Resultate in Form neu generierten Wissens werden dem Produktentwickler durch Visualisierungsmethoden des FAS zur Verfügung gestellt. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden:

- 1) *Welche strukturierten Daten aus dem Produktkontext sind relevant für die Rückführung in den Produktverbesserungsprozess?*
- 2) *Wie kann aus den Feedbackdaten Produktverbesserungswissen generiert werden?*
- 3) *Wie kann dieses Wissen in der Produktentwicklung zur Entscheidungsunterstützung bei einer tiefgreifenden Verbesserung bestehender Produkte führen?*

Daher ist es das Ziel eine fundierte und allgemeingültige Basis für ein FAS zur Produktverbesserung zu schaffen, das auf bewährten wissens- und entscheidungsbasierten Methoden und Strategien aufbaut. Hierzu ist der Feedbackfluss vgl. Abbildung 1 umzusetzen. Die Produktnutzungsdaten müssen akquiriert und verwaltet werden, um eine allgemeingültige Basis für die Analyse der Daten zu schaffen. Das FAS wird den Produktentwickler aktiv bei ausgewählten Prozessen der Produktverbesserung unterstützen, z. B. bei der Bewertung von Verbesserungsalternativen auf Basis von Produktdaten. Dabei wird grundlegend geklärt, wie das FAS zu entwickeln ist, um es in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren. In der Produktentwicklung selbst, werden eine Vielzahl von IT - Systemen wie CAD, PDM oder PLM System verwendet.



**Abbildung 1: Feedbackfluss**

Eine Erweiterung der bestehenden Systeme um die Feedbackdaten einerseits und Methoden zur Analyse dieser andererseits ist aufgrund der umfangreichen Feedbackdaten und der schwierigen Anpassbarkeit bestehender (z.B. PLM) Lösungen nicht sinnvoll umsetzbar. Daher ist es das Ziel, ein FAS zu konzipieren, das webbasiert ist und an bestehende Systeme gekoppelt werden kann. Aus den dargestellten Prozessen des Feedbackflusses ergibt sich das in dem folgenden Abschnitt dargestellte Vorgehen zu der vorliegenden Arbeit.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

*Kapitel 2 Stand der Technik:* Hier wird das Thema Produktverbesserung als Variante der Produktentwicklung zur Einordnung der Arbeit eingeführt, mit den zentralen Phasen und den bekanntesten Vorgehensmodellen, um sodann die aktuellen Forschungsthemen zu formulieren. Das zweite Kernthema der Arbeit ist die Generierung von Wissen aus Daten. Der Grundlagenteil beantwortet die Frage, wie zwischen Daten, Informationen und Wissen unterschieden wird. Des Weiteren ist festzuhalten, welche Feedbackdaten in Frage kommen und welche strukturierten Daten im Umfeld des Produktes erfasst werden. In diesem Zusammenhang sind zwei zentrale Datenlieferanten zu nennen, die Instandhaltung und Condition Monitoring (CM) Systeme.

*Kapitel 3 Entwurf des Feedback Assistenz Systems:* In diesem Kapitel wird das FAS konzipiert und entworfen, das auf Basis der analysierten Feedbackdaten dem Produktentwickler assistiert. Um das zu erreichen, wird nach dem bewährten Vorgehen der Softwareentwicklung vorgegangen und Anwendungsfälle ermittelt, die den Funktionsumfang beschreiben. Diese werden dann als Basis genommen zur Festlegung der Systemarchitektur für das FAS.

*Kapitel 4: Industriegüter:* Zur Veranschaulichung der Funktionen und Ergebnisse des umzusetzenden FAS wird ein Industriegut ausgewählt, zu dem beispielhaft Daten generiert, verwaltet und analysiert werden. Auch sind die Ergebnisse anhand eines weiteren komplexeren Produkts evaluiert worden, von dem reale Daten aus der Praxis vorlagen.

*Kapitel 5 Feedbackdatenübertragung und Verwaltung:* Die Feedbackdaten liegen in verschiedenen Datenbanken vor und müssen in eine zentrale Datenbank des FAS übertragen und verwaltet werden. Dazu werden Data Warehouse (DWH) Technologien angewandt. Hier wird eine Evaluierung der führenden Open Source DWH Anwendungen durchgeführt, anhand der zuvor bestimmten Anforderungen an das FAS. Mittels der ausgewählten Lösung erfolgen sodann die ersten Schritte der Umsetzung, der Extraktion, Transformation und Laden (ETL) Prozess zur Übertragung der Daten in das DWH. Dazu wird vorab ein Feedback Datenmodell für die Feedbackdaten aufgestellt, in das die Daten geladen werden. Sodann ist die Akquise der Feedbackdaten im Detail zu betrachten. Sensordaten werden standardmäßig strukturiert erfasst, dies erfolgt automatisch durch den Einsatz von CM Systemen. Wie eine Industriebefragung ergeben hat, werden Instandhaltungsdaten in der Praxis aktuell hauptsächlich in Form von Protokollen und Berichten „unstrukturiert“ von Servicemitarbeitern erstellt. Zur Erfassung strukturierter Instandhaltungsdaten ist daher ein mobiles System erforderlich, womit die Daten strukturiert erfasst werden können. Daher wird in diesem Abschnitt die automatische Erfassung der Instandhaltungsdaten durch die Anwendung eines mobilen Servicetools betrachtet und deren prototypische Umsetzung.

*Kapitel 6 Wissensbasierte Methodenkombination:* In diesem Kapitel werden die wissensbasierten Methoden und deren Erweiterungen und Einsatzmöglichkeiten im Detail betrachtet. Zu Beginn eine statistische Analyse mittels Kennzahlen zur Validierung der Anforderungen. Dann eine Diagnose zur automatischen Umwandlung von Daten in Wissen, um Fragen wie „Von welchen Parametern hängen die Störungen ab?“ oder „Wie verändert sich die Wahrscheinlichkeit für den Defekt eines Lagers, wenn die Pumpe in einem Gebiet mit hoher Umgebungstemperatur betrieben wird?“ zu beantworten. Das FAS stellt damit dem Produktentwickler verschiedene Analyse- und Diagnosemethoden zur Verfügung, mit denen er den bisherigen Betrieb verschiedener Produktinstanzen oder Produktgenerationen untersuchen kann. Es wird allerdings noch keine Unterstützung der Verbesserungskonstruktion vorgenommen, z.B. in Form von aktiven Handlungsempfehlungen oder der Vorhersage eines Maschinenverhaltens beim Austausch einer Komponente, die eine Schwachstelle darstellt. Hierzu werden mittels eines Entscheidungsunterstützung-Moduls Handlungsempfehlungen für die Produktverbesserung bereitstellt.

*Kapitel 7 Abschluss und Fazit:* Die Arbeit wird noch einmal zusammengefasst betrachtet und eine kritischen Stellungnahme zu den Potentialen und Limitationen des FAS formuliert.

## 2 Stand der Technik

An heutige Industriegüter werden höchste Qualitätsanforderungen in Bezug auf lange Laufzeiten und eine geringe Fehleranfälligkeit gestellt. Der Grundstein für eine niedrige Fehleranfälligkeit bei einem Produkt wird bereits in der Produktentwicklung gelegt. *„Verkürzte Produktentwicklungs- und Markteinführungszeiten gehören mittlerweile ebenso zum Kennzeichen der Wettbewerbsverhältnisse wie die steigende Variantenvielfalt und Komplexität der Produkte und Prozesse des Unternehmens. Dies erfordert letztlich eine innovative Produkt- und Produktionsgestaltung sowie eine effektive Prozesslenkung unter Berücksichtigung neuer Qualitätsstandards und Vorschriften.“* (Mertens & Seidel, 2009). Die Qualität der Produktentwicklung hat wiederum Auswirkungen auf die Produktnutzungsphase, insbesondere die Instandhaltung, deren Hauptaufgabe die Aufrechterhaltung eines funktionsfähigen Zustandes des Produktes ist (Strunz, 2012). Auch sind immer kürzere Entwicklungszeiten gefordert, damit Unternehmen sich erfolgreich auf dem Markt halten können (Lindemann, 2009). Daher liegt der Fokus immer mehr darauf das Unternehmenseigene Know-How zu nutzen und zu verteilen (Lindemann et al., 2012). Um diese Ziele zu erreichen, werden im Kontext der vorliegenden Arbeit, die Feedbackdaten zurückgeführt und analysiert, die

- vom Produkt selbst (z.B. über Sensoren und Kontakte),
- vom Service (z.B. Service- und Instandhaltungsberichte) und
- vom Kunden (z.B. Produktionskennzahlen)

erhoben werden. Die Informationen werden überwiegend für verschleiß- oder sicherheitskritische Bauteile, Produktionszahlen oder zur Abrechnung erhoben. Hierfür werden verstärkt miniaturisierte, eingebettete Sensoren verwendet. Durch rasante Entwicklungen in den Bereichen Sensortechnik, Teleservice und digitaler Dokumentenverwaltung steigt der Anteil der während der Produktnutzungsphase erzeugten Daten von Sensoren stetig an. Deren Daten werden z.B. in der Instandhaltung durch CM Systeme erfasst und in lokalen Datenbanken verwaltet. Eine Auswertung dieser strukturiert vorliegenden Daten wird nur für den spezifischen Einsatzzweck (z.B. die Prävention von Fehlern) vorgenommen. Trotz des hohen Wissensgehaltes und des damit verbundenen hohen Potentials für die Verbesserung folgender Produktgenerationen findet eine Informations- oder Wissensrückführung in die Produktentwicklung kaum statt (Edler, 2001), (Abramovici et al., 2011).

### 2.1 Die Produktverbesserung als Variante der Produktneuentwicklung

Der Erfolg eines Unternehmens hängt unmittelbar mit dem Erfolg seiner Produkte am Markt zusammen. Entwicklung ist im Unternehmen die Umsetzung der Möglichkeiten (aus der Technologie, Forschung) in Produkte, die vom Markt nachgefragt werden (Holzbaur, 2007).

*„Die **Produktentwicklung** ist der Prozess im Unternehmen, mit dem produzierbare und funktionsfähige Produkte gestaltet werden, sowie auch eine als Organisationseinheit identifizierbare Unternehmensfunktion.“* (Ponn & Lindemann, 2011).

Die Entscheidung zur Entwicklung einer Maschine und die anschließende Planung definiert den Beginn des Produktlebens und stellt somit die prägendste Phase im Leben eines Produktes dar (Pahl et al., 2006). Innerhalb der Produktentwicklung werden die späteren Merkmale und Eigenschaften (z.B. das Betriebsverhalten) eines Produktes, ebenso wie die Kosten (z.B. Fertigungskosten, Instandhaltungskosten), die ein Produkt verursacht, festgelegt.

Mit der wachsenden strategischen Bedeutung der Produktentwicklung ist ein verstärktes wissenschaftliches Interesse an der Thematik entstanden (Heindorf, 2010). Die Entwicklung neuer Produkte ist für ein Unternehmen mit vielen Unsicherheiten verbunden, da heute die Produkte für den Markt von Morgen entwickelt werden, der nur begrenzt vorhersehbar ist (Gresse, 2010). Hinzu kommt, dass der gestiegene internationale Wettbewerb, komplexer werdende Kundenwünsche und schnelle technologische Veränderungen heute hohe Anforderungen an die Entwicklung neuer Produkte stellen (Lindemann et al., 2012). Die Entwicklungsprozesse werden immer kundenorientierter und zugleich kosten- und zeiteffizienter gestaltet, um Produkte möglichst zielgerichtet zu entwickeln. Zu lange Entwicklungszeiten oder die Entwicklung nicht benötigter Produkte können für ein Unternehmen große Verluste bedeuten (Schäppi et al., 2005). Das primäre Ziel jedes Unternehmens ist es, Gewinne zu erzielen. Dazu benötigt es wettbewerbsfähige Produkte. Doch ein Produkt verliert mit der Zeit seine Wettbewerbsfähigkeit. Um diese zu erhalten, muss das Produkt weiterentwickelt oder durch ein neues ersetzt werden.

### 2.1.1 Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist seit Mitte der 80er Jahre Gegenstand der Forschung. Eine erste Normierung fand in der VDI 2221 statt, die sich dem Entwickeln technischer Produkte widmete (VDI\_2221, 1993), (Pahl et al., 2006).

Die VDI-Richtlinie wurde als Dachrichtlinie für den gesamten Maschinenbau konzipiert und beschreibt deshalb grob ein Vorgehensmodell und einzelne Teilschritte. In der VDI 2221 ist das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren, orientiert an den zu erstellenden Arbeitsdokumenten, beschrieben. Der Prozess wird, ausgehend von der Entwicklungsaufgabe bis hin zum Abschluss der Konstruktion, in sieben einzelne Schritte unterteilt, aus denen jeweils Dokumente als Arbeitsergebnisse hervorgehen. Diese Ergebnisdokumente (beispielsweise die Anforderungsliste, die Funktionsstruktur und die prinzipielle Lösung) stellen Repräsentationen beziehungsweise Partialmodelle des Produktes mit zunehmendem Konkretisierungsgrad dar. Das Ergebnis des ersten Arbeitsschrittes, die Anforderungsliste, wird ständig angepasst. Hierbei kann zwischen drei Aspekten unterschieden werden:



*Erweiterung*

Hier wird das ursprüngliche Dokument erweitert und konkretisiert.



*Aktualisierung*

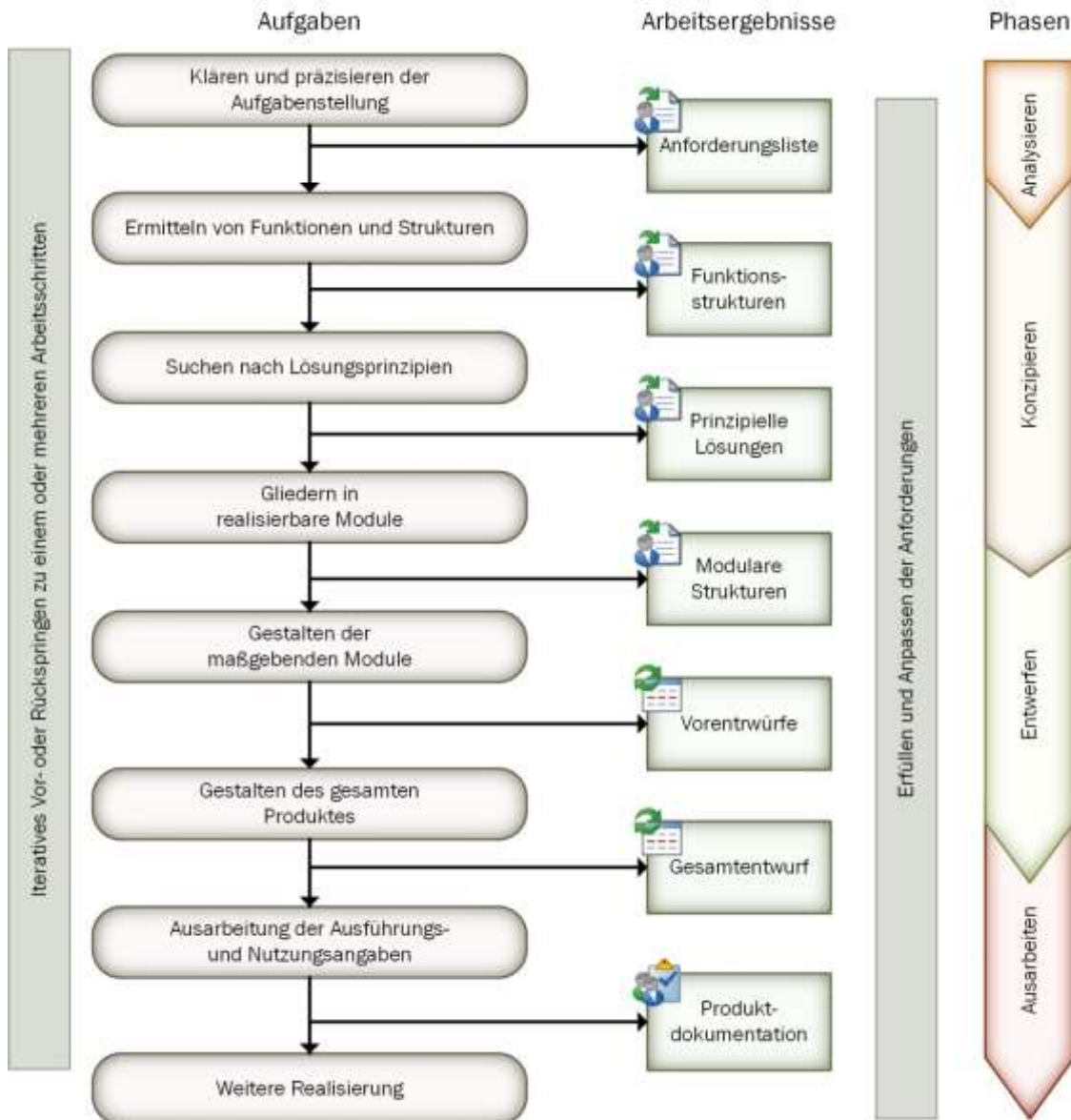
Bei diesen Phasen werden die gemachten Angaben überprüft und aktualisiert.



*Finalisierung*

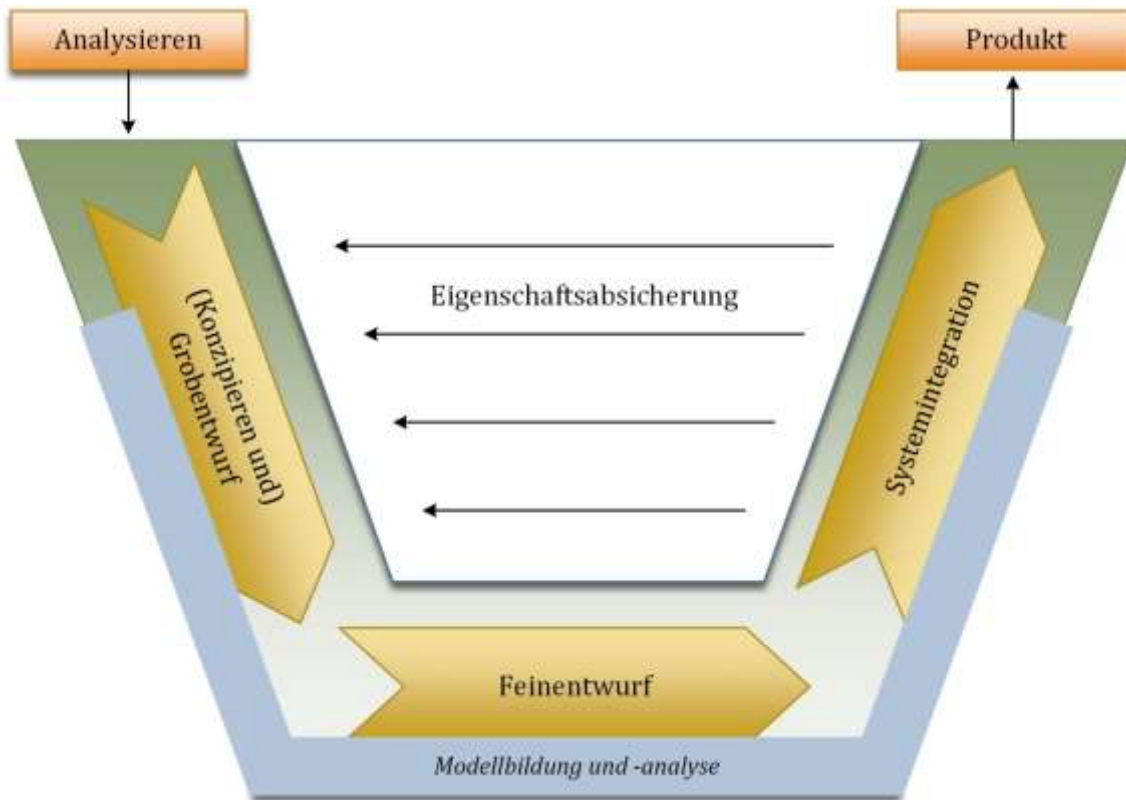
Am Ende des Entwicklungsprozesses muss ein finaler Entwurf vorliegen, anhand dessen das Produkt hergestellt wird.

Weiterhin sind generell Vor- und Rücksprünge vorgesehen, wenn es der Entwicklungsprozess erfordert. Die Darstellung des Vorgehensmodells (Abbildung 2) vermittelt einen stark sequenziellen Charakter, obwohl die Notwendigkeit von Rücksprüngen im Sinne von Iterationen ebenfalls betont wird. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Teilschritte liefern (Pahl et al., 2006) und (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013) in ihren Ausarbeitungen zur Konstruktionsmethodik die Methoden und Vorgehensweisen.



**Abbildung 2: Vorgehensplan der Produktentwicklung nach VDI 2221**

Ein weiterer bekannter Ansatz stellt das V-Modell dar, das ursprünglich aus der Informationstechnik stammt, sich aber mittlerweile in vielen Bereichen etabliert hat. So baut zum Beispiel die VDI-Richtlinie 2206 zum Entwickeln mechatronischer Systeme auf dem V-Modell auf (VDI\_2206, 2003). Die große Stärke des V-Modells ist, dass dem Systementwurf die Systemintegration (vgl. Abbildung 3) gegenübergestellt wird, so dass zur Fehlervermeidung eine direkte Eigenschaftsabsicherung erfolgen kann.



**Abbildung 3: V-Modell nach VDI 2206**

(Pahl et al., 2006) liefern zudem eine umfangreiche, aber trotzdem unvollständige Liste verschiedener bedeutender Konstruktionsmethoden. Es folgten zahlreiche Ausarbeitungen, die die VDI 2221 weiter konkretisierten und unterschiedliche Ansatzpunkte für eine Produktentwicklung suchten (vgl. (Pahl et al., 2006), (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013)). Es gibt zudem noch eine Reihe weiterer Modelle (vgl. (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013)), die auf den zuvor beschriebenen aufbauen, hier aber nicht weiter betrachtet werden.

Wesentliche Aufgaben der Produktentwicklung sind unabhängig von der Entwicklungsmethodik (Pahl et al., 2006), (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013):

- **Analysieren:** Planen der Aufgabe, Definition der Ziele und Formulierung der Anforderungen
- **Konzipieren:** Ermittlung von Funktionen, Suche von Lösungsprinzipien und Erarbeitung des Konzepts
- **Entwerfen:** Bestimmen der Funktionsträger, Grobgestaltung aller Module (Grobentwurf) und Endgestaltung der Module (Feinentwurf)
- **Ausarbeiten:** Erarbeiten der Dokumentationen für Konstruktion, Fertigung und Nutzung

Als abgeschlossen gilt eine Entwicklung, sobald alle Anforderungen erfüllt sind, wofür der Produktentwicklungsprozess mitunter mehrfach durchlaufen werden muss. Das Ergebnis ist nach der letzten Iteration ein zur Fertigung freigegebenes Produkt.



Im Anschluss findet die Herstellung des Produktes bzw. der Maschine statt und anschließend die Überführung zum Kunden in die Nutzung. Eine häufig unterschätzte Phase ist die Inbetriebnahme der Maschine. Im Vergleich zu den anderen Phasen ist diese sehr kurz, bildet aber die Grundlage für den späteren reibungslosen Betrieb. Häufig werden in dieser Phase durch unsachgemäße Montage potenzielle Störungen eingebaut, z.B. fehlerhaft montierte Dichtungen oder falsch ausgerichtete Antriebsstränge. Ein Lösungsansatz zur Reduzierung der Montagefehler ist die konsequente Qualitätsprüfung während der Montage durch Protokollieren der Tätigkeiten und durch die Qualitätsprüfung externer zertifizierter Überwachungsstellen (Schnek, 2010).

Das Management der Produktdaten in Prozessketten wird zunehmend zu einer entscheidenden Einflussgröße der Produktdatentechnologie. Management von Produktdaten bedeutet dabei die Verwaltung (Verschlüsselung, Speicherung und Archivierung) von Produktdaten und Steuerung des Produktdatenflusses auf Prozessketten. Für eine zukunftsorientierte, flexible Unternehmensorganisation ist der Einsatz leistungsfähiger Informations- und Kommunikationssysteme unumgänglich. In der VDI-Richtlinie 2219 werden Produktdatenmanagement (PDM)-Systeme als technische Datenbank- und Kommunikationssysteme definiert, die dazu dienen, Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse bzw. Lebenszyklen konsistent zu speichern, zu verwalten und allen relevanten Bereichen eines Unternehmens bereitzustellen (VDI\_2219, 2002). Um eine Produktentwicklung erfolgreich abzuschließen, muss ein Produktentwickler zahlreiche Herausforderungen bestehen. Die Entwicklungszeiten („time to market“) verkürzen sich aufgrund der Globalisierung und des damit steigenden Konkurrenzdruckes immer mehr (Hahn et al., 2013). Zusätzlich steigen die Anforderungen an das Produkt und auch an die Funktionen, so dass verschiedene Fachrichtungen integriert werden müssen (Hahn et al., 2013).

### 2.1.2 Produktverbesserung

Bei der Produktentwicklung wird differenziert in Bezug auf den Neuheitsgrad der Entwicklung, nach Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion (Pahl et al., 2006), (Ehrlenspiel, 2007), (Ponn & Lindemann, 2011). Daraus ergibt sich die Komplexität der Entwicklungsaufgabe für den Entwickler (Pahl et al., 2006), (Lindemann, 2009):

- **Neukonstruktion:** Hier geht es darum *neue Lösungsprinzipien* zu entwickeln, wo auch der Aufwand für den Entwickler am größten ist. Dazu muss der gesamte Produktentwicklungsprozess durchlaufen werden und zahlreiche Iterationen sind durchzuführen, bei denen die gefundenen Lösungen überprüft und optimiert werden. Eine Neukonstruktion kann sowohl für ein gesamtes Produkt, aber auch für Komponenten bzw. Bauteile durchgeführt werden.
- **Anpassungskonstruktion:** Hier wird auf *bekannte Lösungsprinzipien* aufgesetzt und diese werden angepasst. So haben sich die Rahmenbedingungen, wie Kundenanforderungen oder Gesetze geändert, an die das Produkt angepasst werden muss. Die Anpassungskonstruktion kann auch zu einer Neukonstruktion führen, aber nicht des gesamten Produktes, sondern nur bei einzelnen Komponenten oder Bauteilen des Produktes.

- **Variantenkonstruktion:** Bei der Variantenkonstruktion bleiben die gesamten Prinzipien erhalten. Es erfolgt eine Änderung der Abmessung oder der Austausch einer Komponente durch eine andere Variante. Hierbei ist aber *keine Neukonstruktion* erforderlich, sodass auch nicht der komplette Entwicklungsprozess durchlaufen werden muss.

Unter den letzten Punkt fällt die Produktverbesserung, die durch das FAS unterstützt wird. Aus der Begründung, dass nur zu bereits bestehenden Lösungsprinzipien Feedbackdaten erfasst werden können und sich aus dem daraus generierten Wissen Verbesserungspotential für eben diese Komponenten ableiten lässt.

Bei einer Produktverbesserung wird eine Produktgeneration  $n$  in eine Produktgeneration  $n+1$  überführt, indem die Hauptfunktionen des Produktes beibehalten werden (z.B. bei einer Radialkreiselpumpe die Beförderung eines Mediums) (Dienst et al., 2011). Teilfunktionen (z.B. eine Komponenten, Abdichtung des Gehäuses) können abgeändert werden, jedoch muss hierbei die Funktionssicherheit gesteigert werden (z.B. Einbau resistenterer Dichtungen) (DIN\_31051, 2003). Für eine Verbesserungskonstruktion verringert sich somit der Konstruktionsaufwand im Vergleich zur Produktneuentwicklung dadurch, dass (Dienst et al., 2011):

- die Anforderungen aus der vorhergehenden Produktgeneration bereits bekannt sind, jedoch an die veränderten Rahmenbedingungen (z.B. geänderte Kundenwünsche, neue Normen und Richtlinien) angepasst werden müssen und
- die Phase Konzipieren teilweise oder ganz entfallen kann, da Funktionen und Lösungsprinzipien bereits bekannt sind und nicht neu erarbeitet werden müssen (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013).

Um eine Verbesserung einzuleiten, ist allgemein zuerst ein Soll-Ist Vergleich vorzunehmen. Das Soll ergibt sich durch die Anforderungen der Kunden an das Produkt und für das Ist steht die aktuell in der Nutzung befindliche Produktgeneration. Bei einem solchen Vergleich ist es wichtig, dass die Entscheidungsgrundlage möglichst objektiv ist (Hahn et al., 2013), beispielsweise maschinell erhobene und somit objektive Daten, damit die zu treffende Entscheidung nicht von dem Erfahrungsstand eines einzelnen Produktentwicklers abhängt. Denn nach (Hahn et al., 2013) sind „*Gerade in heutigen Entwicklungsprozessen [...] alle Implikationen und Abhängigkeiten kaum noch für einzelne Personen zu fassen.*“.

Bis jetzt waren die meisten Kaufentscheidungen fast ausschließlich vom Anschaffungspreis abhängig. Zunehmend werden jedoch die Gesamtlebenszykluskosten betrachtet und zudem werden vermehrt Garantien vom Hersteller über die Höhe der Nutzungskosten von bis zu 10 Jahren erwartet. Dieser Trend ist unter dem Namen hybride Leistungsbündel bekannt, was aktuell Gegenstand der Forschung ist.

*Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 29 „Engineering hybrider Leistungsbündel“ wird derzeit im Teilprojekt B3 (Automatisierte Wissensgenerierung im selbstorganisierenden hybrider Leistungsbündel(HLB)-Betrieb) eine Virtual Lifecycle Unit (VLCU) entwickelt, die eine Weiterentwicklung der Life Cycle Unit (LCU) (vgl. DFG-Projekt und National Science Foundation (NSF) „Embedded Watchdog Agent/Life Cycle Unit“) darstellt (Seliger et al., 2010). Ziel ist die Erfassung von HLB-Daten wäh-*

*rend des Betriebs mithilfe eines begleitenden Informationssystems, um Potenziale, Grenzen, Verbesserungen und Erfolgsfaktoren von HLB zu identifizieren. Weiterhin steht eine systematische Untersuchung der HLB-Daten im Zentrum, um neue HLB zu entwickeln und neue Geschäftsfelder zu erschließen (Seliger et al., 2010). Für die Datenerfassung werden hierbei Sensoren, Markierungen oder IT-Dokumente eingesetzt. Durch den Einsatz geeigneter Methoden ist es möglich, automatisiert Befehle zu erteilen (z.B. Sensorbewegung) oder Informationen an das Personal weiter zu leiten. Die Kommunikation findet über Machine-to-Machine oder Human-Machine-Interfaces statt. Das Feedback wird in diesem Projekt an zwei Stellen eingesetzt, direkt während der Nutzung und während der HLB-Entwicklung.*

*„Der SFB 768 (Laufzeit: 2008 – 2020) widmet sich der Verbesserung von Innovationsprozessen integrierter Sach- und Dienstleistungen (Produkt-Service Systeme (PSS) oder Leistungsbündel auf Basis technischer Produkte). Die Effektivität und Effizienz dieser Innovationsprozesse sind die zentralen Zielgrößen des Sonderforschungsbereichs und stellen gleichzeitig wesentliche Herausforderungen innovierender Unternehmen der produzierenden Industrie dar.“ (Lindemann, 2008).*

Dieser Trend führt zu einem Umdenken in der Produktentwicklung. Es wird eine enge Zusammenarbeit mit dem Kunden angestrebt, um die Qualität der Produkte zunehmend zu verbessern. Hierzu wird der Maschinenzustand genau erfasst und dokumentiert. Die Daten dienen zur Identifizierung von kritischen Bauteilen. In der Regel werden sieben bis zehn kritische Bauteile identifiziert, um diese mit Hilfe von Sensoren und einer zustandsorientierten Instandhaltung zu überwachen (Schweiger, 2009). Demnach ist die Instandhaltung ein wichtiger Aspekt bei der Produktentwicklung. Die Instandhaltung und Wartung ist der größte Kostenanteil im laufenden Betrieb. Der Produktentwickler hat allerdings aktuell kaum Zugriff auf die Daten aus der Produktnutzung, an dieser Lücke setzt das FAS an. Zudem hat die Fehleranfälligkeit Einfluss auf die Produktivität von Produkten, da dies zu Stillstandzeiten führt, die Unternehmen möglichst gering halten wollen. Mittels der Feedbackdaten können bestimmte quantifizierte Anforderungen diesbezüglich überprüft und zudem Fehlerursachen ermittelt werden. Dieser Input kann dann genutzt werden, um zu überprüfen, in wie weit eine Entwicklung erforderlich ist und ob der Soll-Wert in Form von Kundenanforderungen erreicht werden kann.

### 2.1.3 Aktuelle Forschungstrends

Nach Eisenhardt und Brown lassen sich hinsichtlich der Produktentwicklung die folgenden Forschungsschwerpunkte identifizieren (Heindorf, 2010):

- a) Bei der ersten Forschungsrichtung wird Entwicklung als **rationaler Planungs- und Durchführungsprozess** verstanden, dessen Effizienz in einer analytischen Steuerung aller Problemlösungsaktivitäten liegt. In der Produktentwicklung gibt es unterschiedlichste Prozesse: Bestehende Produkte werden aufgrund neuer gesetzlicher Vorschriften geändert, neue Produkte werden für die Erschließung zusätzlicher Märkte entwickelt, am Markt befindliche Produkte werden hinsichtlich Qualität und Sicherheit beobachtet, Patente werden geprüft etc. (Lindemann, 2009). Die Forschung zielt nun darauf ab, ausgewählte Prozesse zu optimieren, u.a. mittels Werkzeugen zur Modellie-

- rung von Ressourcen, der Planung von Personen- und Sachmitteln bis hin zum Projektmanagement.
- b) Ein zweiter Ansatz konzipiert Produktentwicklung als Kommunikationsnetzwerk. Kommunikation nimmt demnach eine Schlüsselrolle ein. Hier lässt sich das Stichwort **kollaborative Produktentwicklung** nennen (Lindemann et al., 2012). Dabei wird die *Kommunikation* zwischen Individuen zum Austausch von Informationen *koordiniert*, um sie auf ein Ziel auszurichten und so eine *Kooperation* zu ermöglichen, die sodann auf Gruppen ausgeweitet und somit *Kollaboration* erreicht werden kann (Stiefel, 2011).
- c) Ein dritter Forschungszweig analysiert Entwicklungssysteme aus einer Problemlösungsperspektive. Dabei liegt ein Verständnis der Produktentwicklung als hochkomplexes Netz von Aktivitäten und Interaktionen zur **Informationsgewinnung, -verarbeitung und -weitergabe** unter der Annahme von Unsicherheit und der Begrenztheit kognitiver Fähigkeiten, die mit dem Innovationsgrad eines Produktes zunimmt, zugrunde (Heindorf, 2010).

Die vorliegende Arbeit lässt sich der dritten Forschungsrichtung zuordnen, da der Produktentwickler durch die Akquise und das Management von Produktnutzungsdaten als Grundlage zur Generierung von entscheidungsrelevantem Wissen unterstützt werden soll. Sie dient somit zum Wissenstransfer, um bei dem Prozess der Verbesserung der nächsten Produktgeneration zu assistieren.

*Die Aktualität des Forschungsthemas „Wissenstransfers in der Produktentwicklung“ zeigt u.a. das 2012 gestartete DFG - Projekt „Verbesserung des unternehmensinternen Wissenstransfers durch Knowledge Maps (Maurer, 2012)“. Hier ist der Ansatz die Entwicklung von Knowledge Maps, die Mitarbeitern in Technologieunternehmen eine „Landkarte ihres wichtigen Wissens“ an die Hand gibt, sodass sie ihr Wissen moderieren und effizient weitergeben können (Maurer, 2012).*

*„IN<sup>2</sup> - Von der INformation zur INnovation: Innovationen systematisch entwickeln durch Methoden- und Wissensmanagement“ (Laufzeit 2012-2015) ist ein BMBF - gefördertes Forschungs- und Entwicklungsprojekt. Das Projektziel ist eine verbesserte Ausschöpfung vorhandener Innovationspotenziale durch die konsequente Verknüpfung von Wissensmanagement und Produktentstehungsprozess von der Profilfindung bis zur Modellierung des Profils und der Gestalt des Produktes (IPEK, 2012). Eine besondere Rolle spielen dabei die beteiligten Personen in den Unternehmen, weil ihren Anforderungen an den Produktentstehungsprozess Rechnung getragen werden muss (IPEK, 2012).*

*Das Projekt PDK<sup>bench</sup> am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart beschäftigt sich mit der Bestimmung des konzeptionellen Ablaufs und der Entwicklung eines rechnergestützten Tools zur Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung (IKTD, 2013). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Feststellung des aktuellen Wissensbestands in dem Produktentwicklungsprozess und der Aufdeckung von Fehlbeständen (IKTD, 2013). Auch dieses Projekt zeigt, dass das Ziel, Wissen in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren, als forschungsrelevant angesehen wird, was durch das folgende Zitat gestützt wird. „Wissen wird als "der“*

*Produktionsfaktor der Zukunft angesehen und macht schätzungsweise mehr als 50 % der Wertschöpfung aus.“ (IKTD, 2013).*

*Das DFG Projekt ProKon (Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme) ist ein Gemeinschaftsprojekt, bei dem ein Agentensystem entwickelt werden soll, um den Konstrukteur bei seinen nicht-wertschöpfenden Aufgaben zu entlasten. Die Wissensquellen sind Fachbücher, Normen und Konstrukteure (IKTD, 2013).*

In den Projekten steht das personengebundene Wissen im Vordergrund und nicht die Wissensgenerierung aus Daten. Feedback kann das subjektive von Kunden sein, das in den Verbesserungsprozess integriert wird, mit dem Ziel, die Kundenzufriedenheit zu steigern (Schulte, 2007).

*Im BMBF-geförderte Forschungsprojekt AKINET – Aktive Kundeneinbindung in Innovationsnetzwerke (Laufzeit 2008-2011) bearbeiteten Psychologen und Ingenieure die Fragestellungen aus dem Bereich Open Innovation. „Ziel des Projektes ist die Erstellung eines Leitfadens zur Kundenintegration für kleine mittelständische Unternehmen“ (Kirschner, 2011). Bei diesen Projekt, an dem u.a. die TU München beteiligt ist, steht das „menschliche Feedback“ im Vordergrund. Dieses subjektive Feedback ist von den Meinungen der Kunden behaftet und bezieht sich meist auf eine bestimmte Maschine. Daher können diese Informationen hauptsächlich genutzt werden, um eine einzelne Maschinen zu verbessern und nicht, um ein allgemeingültiges Potential zur Verbesserung einer Produktgeneration abzuleiten. In der vorliegenden Arbeit hingegen steht das strukturierte Feedback, das maschinell erfasst wird, im Vordergrund. Dafür sind wissensbasierte Methoden aus dem Bereich des Data Mining einzusetzen bzw. anzupassen, um daraus Wissen zu generieren.*

*Im Verbundprojekt EUREKA-ALARM, wird am Beispiel der Konstruktion einer Windenergieanlage, ein IT-basiertes Assistenzsystem entwickelt, dass entwicklungsbegleitende Analysen zur ganzheitlichen Auslegung von Produkten anbietet (REpower, 2010). Im Laufe des Projektes erfolgt die Analyse unterschiedlicher Simulations- und Messdaten (FEM gestützte Festigkeitsnachweise, Mehrkörpersimulationen, ...) (REpower, 2010). Der Einsatz dieses Assistenzsystems soll verhindern, dass Konstruktionsmängel erst sehr spät nach Prototypentests erkannt werden können und zu deren Behebung wieder in die frühe Konzeptphase zurückgesprungen werden muss.“ (REpower, 2010). Es findet dabei keine Rückführung der Daten in eine vorgelagerte Phase statt.*

Die Rückführung von Instandhaltungsdaten gewinnt momentan an Relevanz, vor allen durch den vermehrten Einsatz neuer Geschäftsmodelle (HLB) und produktbegleitender Dienstleistungen (Frohs, 2010). Dabei geht es hier nicht nur darum, CM - Daten, sondern auch die Daten der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen durch die Servicemitarbeiter zu erfassen. Dabei ist es das Ziel, anfallende Daten frei von Medienbrüchen in vorhandene Datenbanken zu übertragen, sodass diese strukturiert vorliegen.

So wird z.B. im Rahmen des seit 2006 durch das BMBF geförderten Projekts „Prozessorientierte Integration von Produktentwicklung und Servicedokumentation zur Unterstützung des technischen Kundendienstes (PIPE)“ eine mobile Software zur Erfassung von Servicedaten entwickelt (Thomas et al., 2010).

Es hat sich anhand der Projekte (vgl. Tabelle 1) gezeigt, dass im CM - Bereich umfangreiche Forschung betrieben wird.

**Tabelle 1: BMBF Forschungsprojekte zu Condition Monitoring**

Name	Laufzeit	Zielsetzung
<b>Vera<sup>Pro</sup> - Ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen</b>	2006-2009	Entwicklung eines Verfügbarkeitsmanagementsystems, das eine aussagekräftige Bewertung des aktuellen Maschinenzustands erlaubt und so die Basis für eine Optimierung der Wartungsaktivitäten darstellt (Meier, 2009).
<b>ZuPack - Zustandsorientierte Instandhaltung von Verpackungsmaschinen</b>	2006-2009	Entwicklung eines kostengünstigen Zustandsüberwachungssystems für hochbelastete Komponenten von Verpackungsmaschinen (Brecher, 2010).
<b>ZuPro - Zuverlässige Produktionsanlage</b>	2006-2009	Verfügbarkeitssteigerung von Produktionsanlagen sowie die Senkung von Wartungs- und Reparaturkosten durch die Entwicklung von CM Verfahren (Brecher, 2011).
<b>VerStand- verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung</b>	2007-2010	Ganzheitlicher, verfügbarkeitsorientierter Instandhaltungsansatz, der produzierenden Unternehmen hilft, die wesentlichen Stellhebel im Bereich der Instandhaltung zur Steigerung der Verfügbarkeit optimal zu nutzen (Schuh et al., 2007).
<b>Make-It - Maschinenzustandsbasierte Verfügbarkeitsdienstleistungen für hochproduktive Fertigungsanlagen</b>	2007-2010	Bereitstellung von Systemlösungen, Planungsstrategien und Dienstleistungskonzepte, die eine Steigerung der Verfügbarkeit von Produktionsmaschinen sowie eine Minimierung des Risikos für Maschinenhersteller und -betreiber bewirken (Denkena et al., 2009), (Denkena, 2010).
<b>OPILAST - Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung</b>	2006-2009	Analyse und das Monitoring der auf die Maschinentech-nik wirkenden Belastungen (Munzinger & Schopp, 2009)
<b>„VerMont - Verfügbarkeit von höchstpräzisen mechatronischen Montageanlagen</b>	2007-2009	Entwicklung, Erprobung und pilothafte Realisierung eines ganzheitlichen Konzeptes zur Erhöhung der Verfügbarkeit von höchstpräzisen mechatronischen Montageanlagen mit Hilfe abgestimmter Eingriffe in die Steuerungs- und Assistenzebene (Richter et al., 2010).
<b>VIPRO - Vorausschauende zustandsabhängige Instandhaltung an Produktionsmaschinen</b>	2007-2010	Erhöhung der technische Verfügbarkeit von Produktionsmaschinen, insbesondere von spanenden Werkzeugmaschinen (Neugebauer, 2011).

Dabei ist es das Ziel, die erfassten CM - Daten in die Instandhaltung zu integrieren um diese zu optimieren. Es soll also der Weg von einer ausfallbedingten hin zu einer optimierten vorbeugenden bzw. zustandsorientierten Instandhaltung beschriftet werden. Zu definierten Zeitpunkten der Produktnutzung werden Daten aus dem Betrieb z.B. für das Qualitätsmanagement, die Leistungsbewertung oder das Kostenmanagement erhoben, aber nur punktuell verwendet (Seliger et al., 2010). Eine detaillierte und nachgelagerte Analyse oder Zurückführung der Daten bleibt aus. Zudem stehen die CM - Daten meist nur abteilungsintern zur Verfügung und werden nicht oder nur eingeschränkt an andere Anwender übertragen (Edler, 2001). Ein großer Vorteil dieser Daten ist, dass sie aufgrund ihrer Messbarkeit objektiv sind (Schulte, 2007). Somit haben sie in Bezug auf die Nutzung eine höhere Aussagekraft als subjektive Daten, die beispielsweise in Kundenbefragungen oder durch Marktforschungen, die zeit- und kostenintensiv sind, gewonnen werden können. Diese Daten bilden die Basis für das aufzusetzende Assistenzsystem.

*Die Aktualität dieses Themas zeigt das im Januar 2013 gestartete BMBF Forschungsprojekt „LeWiPro - Akquisition und Nutzung von Lebenszyklus-Wissen für Produktinnovation in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU). Im Projekt sollen Daten aus dem Produktlebenszyklus durch den Einsatz moderner informationstechnischer Werkzeuge automatisiert ausgewertet werden. Dazu werden beispielsweise Data-Mining-Algorithmen eingesetzt, um in den Daten Muster zu erkennen und auf diese Weise neues, wertvolles Wissen für Herstellung und Nutzung zukünftiger Produkte zu extrahieren. Daten als einer der wichtigsten Rohstoffe des 21. Jahrhunderts werden so nutzbar gemacht“ (Pumacy Technologies, 2013).*

*Auch PROMISE (Laufzeit 2004-2008, FP6-IST-IP) war ein internationales Forschungsprojekt im IMS-Programm (Intelligent Manufacturing Systems). PROMISE steht für “Product Lifecycle Management and Information tracking using Smart Embedded Systems” (Moseng, 2008). Auch hier zeigt sich die Zielrichtung, einen Feedbackfluss umzusetzen, allerdings über den gesamten Produktlebenszyklus zur Verbesserung der Produkt- und Servicequalität, Effizienz und Nachhaltigkeit (Moseng, 2008).*

Bei diesen Projekten liegt im Prinzip dieselbe Herangehensweise zu Grunde wie in der vorliegenden, nämlich strukturierte Daten zu erfassen und zu analysieren, allerdings mit dem Unterschied, dass das Ziel die Aufdeckung von Innovationspotential ist. Das zeigt die Forschungsrelevanz der vorliegenden Arbeit. Anfangs war die Idee entstanden, die Feedbackdaten zurückzuführen und in ein PLM System zu integrieren (Abramovici et al., 2008), (Neubach, 2010). Ein PLM System besteht aus einer Kombination von verschiedenen Softwarelösungen wie CAD, CAE, etc. je nach Bedarf des Nutzers (Sandler, 2009), (Eigner & Stelzer, 2012). Es wird dabei das Ziel verfolgt nicht nur eine Phase des Produktlebenszyklus zu unterstützen sondern alle Phasen miteinander zu vernetzen (Schöttner, 1999), (Scheer et al., 2006), (Herrmann, 2010). Aktuell wird das PLM System Schwerpunktmäßig in der Produktentwicklung eingesetzt, Lösungen für die nachgelagerten Phasen der Nutzung und Entsorgung werden heute nicht angeboten (Feldhusen & Gebhardt, 2008), (Herrmann, 2010). Während der Umsetzung im Rahmen des DFG Forschungsprojekt WiR-Pro („Erweiterung des Product Lifecycle Managements durch wissensbasierte Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung“) (Laufzeit 2009-2012) hat

sich jedoch gezeigt, dass diese Lösung aufgrund der umfangreichen Feedbackdaten und der schwierigen Anpassbarkeit bestehender PLM - Lösungen nicht umsetzbar ist (Dienst et al., 2014). Daher ist in der vorliegenden Arbeit der Ansatz gewählt worden, die Verwaltung und Analyse der Feedbackdaten in einem eigens dafür aufgesetzten FAS zu realisieren, dass dann an ein PLM-System angekoppelt werden kann oder als Standalone Lösung (Dienst et al., 2014). Dieses Vorgehen ist im Rahmen des WiRPro Projektes evaluiert worden. Um das Ziel dieser Arbeit zu verdeutlichen, aus Daten Wissen zu generieren, wird in dem folgenden Abschnitt diese Unterscheidung dargestellt.

## 2.2 Daten - Informationen - Wissen

Wird von „Wissen“ gesprochen, sind weder Daten noch Informationen gemeint und dennoch sind diese Begriffe eng miteinander verwandt und können ineinander überführt werden. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen wird als Prozess der Bedeutungsanreicherung beschrieben (Soukup, 2001), (Lehner, 2012).

***Daten** sind Fakten zu gewissen Ereignissen oder Vorgängen. Sie sind objektiv und beinhalten keinerlei Interpretation über das warum, wann oder wo. Daten entstehen, wenn Zeichen in eine Ordnung gebracht und kodiert werden (Bodendorf, 2006).*

Als Kodierungsformen von Daten gelten Zahlen, Sprache, Buchstaben oder Bilder. Formen nichtverbaler Kommunikation oder von Verhaltensweisen gehen somit als Daten verloren (Bodendorf, 2006). Es wird zum Beispiel ein Messwert an einer Maschine erfasst, womit ausgesagt werden kann, wie hoch der Wert ist und zu welchem Zeitpunkt er erfasst wurde. Daten geben aber keinen Aufschluss darüber, was der Wert aussagt, ob er im normalen Bereich liegt, ob er nochmal gemessen wird oder ähnliches. Solche Angaben wären dann die Informationen bzw. Wissen, dass man aus den Daten ableiten kann (Davenport & Prusak, 1998). Die Daten stellen die elementare Basis, die innerhalb des Anreicherungsprozesses erfasst und in Informationen und Wissen weiterverarbeitet werden (Willke, 2001), (Keuper & Neumann, 2009) und sind umfangreicher als Informationen und Wissen. Die Daten werden verdichtet zu Informationen, d.h. nur die Daten, die mit dem Kontext zu tun haben, werden betrachtet. Alle anderen Daten werden nicht berücksichtigt.

***Information** sind Daten denen eine Bedeutung (Semantik) zugeordnet wurde, d. h. man assoziiert einen Begriff, eine Vorstellung aus der realen Welt oder theoretischer Art (Bodendorf 2006).*

Information hat eine dynamische Komponente, sie ist eine Neuigkeit, die wir aus Datenquellen erfahren und an andere weitergeben (Beierle & Kern-Isberner, 2008). Der Empfänger entscheidet ob die Nachricht für ihn eine Information darstellt und einen bedeutsamen Unterschied im Vergleich zum vorherigen Erkenntnisstand mit sich bringt (Willke, 2001).

**Wissen** bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Es stützt sich auf Daten und Informationen und ist nach (Probst et al., 2012) an Personen gebunden. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-



Zusammenhänge (Probst et al., 2012). Wissen ist somit der Mehrwert, der sich zu den Informationen ergibt, sodass nicht nur die verdichteten Informationen zu einem Problem angezeigt werden, sondern auch noch das Wissen dazu, wie das Problem gelöst werden kann, z.B. Best Practices. Es gibt aber auch Wissen, das sich aus nicht - personengebundenen Daten generieren lässt (Gronau, 2006) (Runkler, 2010), dass für den Kontext dieser Arbeit relevant ist.

*„Wissen sind Informationen, die themenbezogen bzw. personenbezogen zur Verfügung gestellt werden und eine Interpretation über das wie, warum und über Zusammenhänge zulassen.“ (Probst, 2012)*

Informationstheoretisch geht man davon aus, dass zwischen Daten, Informationen und Wissen ein hierarchisches Verhältnis besteht (Lehner, 2012), so dass man in diesem Zusammenhang auch von einer Wissenspyramide spricht (Jaspers & Fischer, 2008). Die Möglichkeit, Wissen in Informationen oder Daten zu transformieren, ist ebenso wichtig wie der umgekehrte Weg. Denn erst die Information macht Wissen kommunizierbar, erst die Ebene der Daten macht es überprüfbar (Wehner et al., 2002). Eine zentrale Aufgabe des Wissensmanagement (WM) ist es daher, das erzeugte Wissen zu managen und kontextorientiert sowie erfolgsorientiert zu verteilen und zu nutzen (Mertens & Seidel, 2009), (Meixner & Haas, 2010). Dabei handelt es sich um einen zyklischen Prozess (VDI\_5610\_1, 2008), (Probst et al., 2012), da man bei Wissen von einem Gut spricht, das ständig aktualisiert und gepflegt werden muss, da es ansonsten seinen Wert verliert.

### **2.3 Feedbackdaten**

Nach der Entwicklung und Produktion beginnt mit der Übergabe der Maschine an den Eigentümer die Nutzungsphase. Diese ist im Regelfall die am längsten andauernde Phase. Beispielsweise erwarten Kraftwerke, chemische und verfahrenstechnische Industrie von Pumpen und von anderen technischen Baugruppen Lebensdauern von 18 bis 25 Jahren. Die Länge des Betriebs hängt von den Einsatzbedingungen und der Anzahl der Instandhaltungen ab. Die Häufigkeit der durchgeführten Instandhaltungen trägt maßgeblich dazu bei, die Abnutzungsprozesse zu verlangsamen und somit die Lebensdauer des Produkts zu erhöhen.

Die Stärkung des Servicegedankens in der Produktentwicklung führte zu einer Reihe von organisatorischen und technologischen Neuerungen und somit zu nachhaltigen Veränderungen auf dem Markt der Industriegüter. Heutige Industriegüter zeichnen sich dadurch aus, dass sie in ein Geschäftsmodell eingebunden sind und als Kombination aus Sach- und Dienstleistungen vermarktet werden. Zur Erreichung der vereinbarten Dienstleistungsziele - in der Regel Instandhaltungs- und Serviceleistungen, die während der Produktnutzungsphase erbracht werden - sind moderne Industriegüter mit Sensoren ausgestattet, die zur Produktions- und Zustandsüberwachung eingesetzt werden (Hesse & Schnell, 2009). Weiter vorangetrieben wurde diese Entwicklung durch die Fortschritte im Bereich der Fertigungs- und Mikrotechnik, die die Preise und Baugrößen von Sensoren stetig sinken lässt (Reichel et al., 2009).

Folglich werden insbesondere während der späten Phasen des Produktlebenszyklus (Produktnutzungsphase und Produktentsorgungsphase) zahlreiche Daten generiert, die wich-

---

tige Informationen über den tatsächlichen Betrieb eines Industriegutes enthalten können. Die Rückführung der während der späten Phasen des Produktlebenszyklus generierten Daten in die Produktentwicklung bezeichnet man als „Feedback“. Feedbackdaten können dazu beitragen, die Entwicklung von neuen Industriegütern zu vereinfachen und zu beschleunigen (indem z.B. bekannte und bewährte Lösungen wieder verwendet werden) oder bestehende Industriegüter zu verbessern (indem z.B. anfällige Komponenten durch haltbarere Komponenten ersetzt werden). Die Feedback - Datenlieferanten sind die Maschinen (z.B. mittels Sensoren), die Servicemitarbeiter (z.B. mittels Servicetools), aber auch die Kunden selbst (Abbildung 4) (Dienst et al., 2014). Grundsätzlich können die Feedbackdaten in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden (Bracht et al., 2011):

- **strukturierten Daten:** Daten (zum Beispiel in Datenbanken oder Dateien), die eine gleichartige Struktur auf weisen, wie Sensordaten, Wartungsdaten,
- **unstrukturierte Daten:** digitalisierte Informationen, die in einer nicht formalisierten Struktur vorliegen (beispielsweise Dokumente, beliebige Texte), wie Verbesserungsberichte, Wartungsprotokolle, Patente, ausgewählte Internetportale...

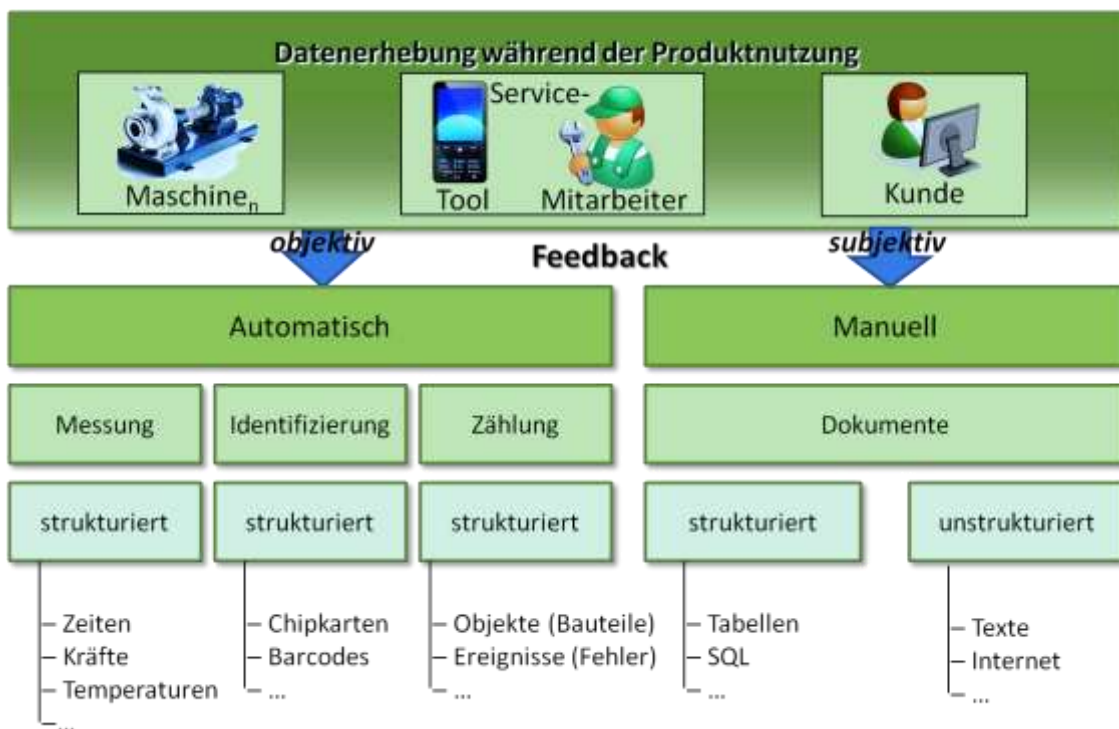


Abbildung 4: Feedbackdaten

Die strukturierten und unstrukturierten Daten werden nach (Bracht et al., 2011) nach der Erfassung in automatische und manuelle eingeteilt, wobei diese sich noch mal unterteilen in Messung (numerisch), Identifizierung und Zählung bei der automatischen Erfassung und nach Dokumenten bei der manuellen. Objektive Produktnutzungsdaten bezeichnen Betriebsdaten (z.B. Nutzungszeiten, Nutzungsdauer, Art der Nutzung) und Messdaten aus dem Betrieb des Produktes. In dieser Arbeit werden die strukturierten Daten als Grundlage genommen, um aus diesen Wissen zu generieren. Für die Verbesserung von

Folgeprodukten können nur Daten eingesetzt werden, die die folgenden zwei Kriterien erfüllen:

- a) sie müssen einer Produktinstanz eindeutig zugeordnet werden können und
- b) sie müssen von objektiven Datenquellen stammen.

Als Datenquellen sind in diesen Zusammenhang die Instandhaltung und CM zu nennen.

### 2.3.1 Instandhaltung

Die Instandhaltung ist in der DIN 31051 definiert als:

*„Kombination aller technischer und administrativer Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während dem Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustands oder der Rückführung in diesen, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“ (DIN\_31051, 2003).*

Das Hauptziel dabei ist, eine möglichst störungsfreie Nutzungsdauer durch die Verzögerung von Verschleiß-, Abnutzungs-, Zerstörungs- und Verfallsvorgängen bei Maschinen zu erreichen (Strunz, 2012). Ein nicht funktionsfähiger Zustand ist meistens die Folge eines **Ausfalls** bzw. **Fehlers**, wobei die verschiedenen Fehler sehr unterschiedlich sein können. Diese werden unter anderem danach unterschieden, was die Ursache oder wie der Schweregrad ist. Ein Ausfall einer Produktionsmaschine entsteht, wenn die zulässige Abweichung von einem Leistungsziel der Maschine überschritten wird (DIN\_25424, 1981). Die Leistung der Produktionsmaschine wird von Sensordaten gemessen, wenn diese oberhalb bzw. unterhalb von zuvor festgelegten Grenzwerten liegen, ist ein Ausfall gegeben. Die verschiedenen Möglichkeiten des Ausfalls einer Komponente werden als Ausfallarten bezeichnet (DIN\_25424, 1981). Es gibt zum einen die *primären Ausfälle*, die trotz zulässiger Einsatzbedingung wegen Abnutzung eintreten (Pawellek, 2013). Eine Abnutzung ist unvermeidbar, jedoch können Komponenten verbaut werden (sogenannte Verschleißteile), die durch die eigene Abnutzung andere Komponenten vor der Abnutzung schützen (Strunz, 2012). Ein *kommandierter Ausfall* liegt vor, wenn die Komponente funktionsfähig ist, aber eine fehlende Anregung (z.B. Kontakt) oder der Ausfall einer Hilfsquelle zum Fehler führt. Der *sekundäre Ausfall* schließlich entsteht bei unzulässigen Einsatzbedingungen, wenn z.B. ein falsches Ersatzteil verbaut wurde.

Über die Nutzungszeit von Maschinen und Anlagen wird deren Ausfallverhalten relativ verlässlich durch die Phasen des Früh-, Zufalls- und Spätausfalls geprägt. Dieser Verlauf kann idealtypisch auch als sogenannte „*Badewannenkurve*“ bezeichnet werden (Reichel et al., 2009).

- *Frühausfälle* basieren auf Fehlern, die bereits bei der Auslieferung des Produktes vorhanden waren bzw. durch eine falsche Installation verursacht wurden, z.B. Software-, Projektierungs-, Konstruktions-, Fertigungs- und Montagefehler. Die Ausfallrate ist am Anfang der Nutzungsphase der Maschine besonders hoch, sinkt aber dadurch, dass die Fehler behoben werden.
- Eine konstante Ausfallrate ergibt sich während der langjährigen Nutzungsdauer, der *Phase der Zufallsausfälle*. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in einer Anlage verschiedene Komponenten, deren Lebensdauer kürzer ist als die Lebensdauer der

Anlage, nach und nach ausfallen und wieder repariert werden. Ebenso trägt menschliches Verhalten zur konstanten Fehlerrate bei. Fehlbedienung oder das Nichtbeachten von Wartungsintervallen sind beispielsweise Ausfallursachen, die statistisch über die Betriebszeit verteilt auftreten können. Diese Zeit muss genutzt werden, um das Langzeitverhalten aufgrund von *Verschleißcharakteristiken prognostizierbar* zu machen, um eine effiziente Instandhaltungsstrategie (z.B. zustandsorientiert) umzusetzen.

- Zum Lebensende von Produkten steigt die Anzahl der Ausfälle in der *Phase der Spätausfälle* wieder an. Aufgrund regulärer technischer Abnutzung eines langzeitigen Produktionsbetriebes versagen auch Funktionshauptkomponenten wie z. B. Kugelgewindetriebe, Führungssysteme, Spindellagerungen und vieles mehr (Reichel et al., 2009). Je präziser diese Prognosen gelingen, umso zielgerichteter kann ein Austausch ohne nennenswerte Produktionsstörung durchgeführt werden (Reichel et al., 2009). Die Ausfallrate wird durch die Belastung, der ein Produkt ausgesetzt ist, beeinflusst. Durch die Häufung von Ausfällen sinkt die Verfügbarkeit der Anlage soweit, dass kein geordneter Betrieb mehr möglich ist, sodass die Anlage als Gesamtsystem das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat.

Um eine Maschine in einem funktionsfähigen Zustand zu halten, gibt es die folgenden Grundmaßnahmen in der Instandhaltung (DIN\_31051, 2003):

- *Wartung* (Aufrechterhaltung des Abnutzungsvorrats),
- *Inspektion* (Feststellen des Ist-Zustands und Festlegen weiterer Maßnahmen)
- *Instandsetzung* (Rückführung der Anlage in einen funktionsfähigen Zustand) und
- *Verbesserung* (Steigerung der Funktionssicherheit ohne Änderung der Funktion).

Die Grundmaßnahmen werden immer vor Ort vom Servicemitarbeiter durchgeführt. Dabei entstehen die erforderlichen Feedbackdaten für das FAS, die sich nach den zwei Schwerpunkten Kosten (wie eingesetzte Materialien) und Zeit (wie der Zeitpunkt des Ausfalls) gliedern lassen. Die Dokumentation erfolgt sowohl in Service-/Wartungsprotokollen, als auch digital (Alcalde Rasch, 2000). Früher ist die Instandhaltung durchgeführt worden, wenn ein Fehler an der Maschine aufgetreten ist, der Trend heute geht zu einen ganzhaltigen Instandhaltungsmanagement, bei dem verschiedene Strategien zum Einsatz kommen (Schröder, 2010). Derzeit existieren im Wesentlichen zwei Grundstrategien in der Instandhaltung mit verschiedenen Ausprägungen vgl. Abbildung 5 (Alcalde Rasch, 2000), (Matyas, 2002), (Reichel et al., 2009):

- *Ausfallbedingte (Reaktive) Instandhaltung*: In der ausfallbedingten oder korrektiven Instandhaltung wird eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt, wenn bereits ein Fehler vorliegt. Durch die Instandsetzung wird die Betrachtungseinheit wieder in einen funktionsfähigen Zustand gebracht.
- *Vorbeugende (Präventive) Instandhaltung*: In der vorbeugenden Instandhaltung werden die Komponenten ausgetauscht, bevor ein Fehler aufgetreten ist. Diese wird unterteilt in:
  - *Zeitabhängig Instandhaltung* (oder periodische), dabei werden die Komponenten zu festen Zeitpunkten (Wartungsintervalle) ausgetauscht, bei denen noch kein Ausfall zu erwarten ist. Hierfür müssen Grenzwerte aufgestellt werden, ab wann die Instandhaltung ausgelöst wird. Hier liegt der Fokus mehr auf der Vermeidung

von Fehlern als auf dem Optimum zwischen Vermeidung des Einsatzes und der Minimierung der Kosten.

- *Zustandsabhängigen Instandhaltung*: Bei der zustandsorientierten Instandhaltung wird ein Ausfall verhindert, indem der Maschinenzustand überwacht wird und Komponenten erst dann ausgetauscht werden, wenn ein Ausfall zu erwarten ist.
- *Vorrausschauende Instandhaltung* ist die Weiterentwicklung der zustandsabhängigen Instandhaltung. Hierbei geht es darum, früh einzuschreiten, um einen Ausfall zu verhindern.

Ein großes Problem bei den Servicedaten ist die Frage, wie der Produktentwickler an diese gelangen kann. Eine Lösung dieses Problems liefern die hybriden Leistungsbündel, die Kombinationen aus Sachgütern und Dienstleistungen (Backhaus et al., 2010) oder wenn der Kunde die Instandhaltungsmaßnahmen selbst durchführt. Bei externen Serviceanbietern ist nicht davon auszugehen, dass der Hersteller Zugriff auf die Daten erhält.

### 2.3.2 Condition Monitoring

Das Condition Monitoring (CM), zu Deutsch „Zustandsüberwachung“, bezeichnet die eingesetzte Strategie zur Umsetzung der vorbeugenden Instandhaltung.

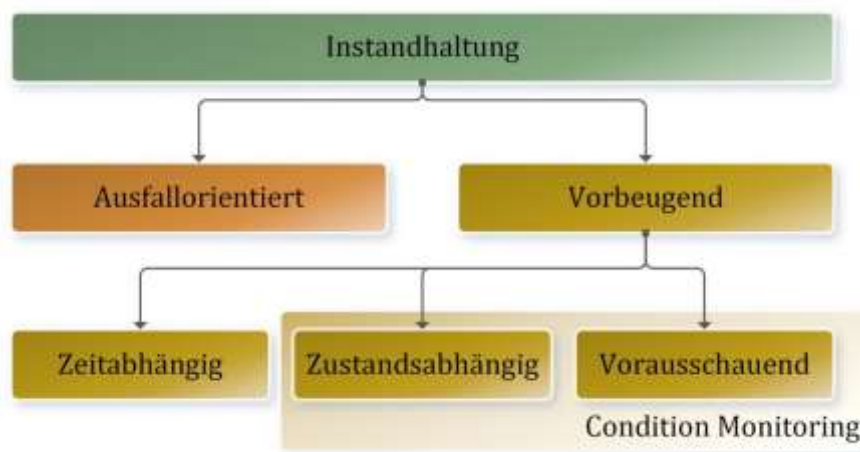


Abbildung 5: Instandhaltungsstrategien nach (Matyas, 2002), (Schnek, 2010)

Durch CM-Systeme wird die permanente Überwachung verschleißbehafteter Maschinenelemente wie Lager oder Dichtungen gewährleistet, um so durch eine vorbeugende Instandhaltungsmaßnahme einen zu erwartenden Fehler und damit Stillstandzeiten der Maschine zu vermeiden. CM ist die Gesamtheit aller Maßnahmen und Verfahren, die zur Ermittlung und Bewertung des technischen Zustandes von Anlagen unter Berücksichtigung der spezifischen Einsatzbedingungen eingesetzt werden (Isermann, 2005), (Schnek, 2010). Grundsätzlich lässt sich eine technische Diagnose mit verschiedenen Verfahren und technischen Ausstattungsformen realisieren. Der Einsatz von CM-Systemen unterstützt die Instandhaltung bei der Erreichung folgender Zielstellungen (Schnek, 2010):

- Diagnose von Schädigungsverläufen und Grenzwertüberwachung
- Erkennen potenzieller Schädigungen und Verhinderung von Anlagenausfällen und Folgeschäden.

Dazu werden Daten von Sensoren erfasst und beobachtet. Wenn diese außerhalb von Grenzbereichen liegen, erfolgt eine Benachrichtigung, sodass der Servicemitarbeiter agieren kann. Damit lassen sich zeitnah Maßnahmen des Anlagenbetriebs und der Instandhaltung einleiten (Schnek, 2010). Dieser Zeitgewinn versetzt die Instandhaltung in die Lage, aktiv Anlagenausfälle zu verhindern (Schnek, 2010). Als Randbedingung gilt, dass die Diagnose in der Regel bei laufendem Betrieb der Anlage und ohne Demontagen bzw. Stillsetzungen von Anlagenteilen erfolgen soll (Sturm & Förster, 1990).

Durch den technischen Fortschritt und die sinkende Kosten im Mikro-Engineering werden Sensoren für die Datenerfassung immer kostengünstiger (Reichel et al., 2009). Zeitgleich verbessert sich die IT-Infrastruktur und es werden stetig neue Methoden und Werkzeuge zur Auswertung der Daten entwickelt (Reichel et al., 2009). Die Messdaten lassen sich allgemein nach (Grote & Feldhusen, 2012) in die drei folgenden Kategorien unterteilen:

- **Form- und Stoffgrößen:** Sie umfassen alle Größen, die die Abmessung und Zusammensetzung eines betrachteten Objekts oder Systems beschreiben (z.B. Abstände, Gewicht).
- **Funktions- und Prozessgrößen:** Mit diesen Größen können die Form der Beanspruchung der Bauteile und ihr Zustand bzw. ihre Zustandsänderungen beschrieben werden (z.B. Druck, Temperatur, Massenstrom).
- **Umweltwechselwirkungsgrößen:** Diese Größen sind fest vorgegeben, aufgrund des Standorts des betrachteten Objektes oder Systems und entsprechen den Umweltbedingungen oder den Wechselwirkungen mit anderen Systemen, die nicht unbedingt mit dem Betrachtungsraum in Interaktion stehen (z.B. Umgebungstemperatur, Luftfeuchte).

Besonderes Interesse liegt dabei auf den Funktions- und Prozessgrößen, die den Zustand des Produktes während der Nutzungsphase beschreiben oder festlegen (Hesse & Schnell, 2009). Für solche Größen werden Sensoren verwendet. Sensoren finden typischerweise Anwendung bei der Regelung eines Prozesses zur Bestimmung der tatsächlichen Funktions- und Prozessgrößen, wie auch bei Betriebsdaten. Die Zahl der von Sensoren erfassbaren physikalischen Größen wird auf über 100 geschätzt (Roddeck, 2006). Weiter sollen etwa 2000 verschiedene Sensortypen existieren, die in ca. 100 000 Varianten weltweit kommerziell angeboten werden (Roddeck, 2006).

Die Speicherung der gemessenen Daten kann vor Ort (Offlinebetrieb) oder zentral (Onlinebetrieb) realisiert werden. Onlinebetrieb bedeutet folglich, dass die Messeinrichtungen an ein Netzwerk für die Datenübertragung angeschlossen sind. Die große Herausforderung besteht darin, einerseits die im Onlinebetrieb langfristig erzeugbare Datenflut auf das Notwendigste zu begrenzen und andererseits Grenzwerte zu finden, die eine Instandhaltung notwendig machen (Reichel et al., 2009). Hierfür sind wiederum Wissen und praktische Erfahrung erforderlich (Reichel et al., 2009). Allerdings setzt die eingesetzte Technik häufig technische Grenzen hinsichtlich der Anzahl und Auflösung der Messgrößen, so dass komplexe Einflüsse oftmals nicht erfasst werden können (Schnek, 2010). Beim Offlinebetrieb existiert keine solche Verbindung. Die Daten werden in einem eigenen Datenspeicher abgelegt und müssen bei Bedarf vor Ort ausgelesen werden (z.B. durch einen Servicemitarbeiter). Die von den Sensoren gesammelten Daten werden zur weiteren Verarbeitung

---

erfasst (Bertsche et al., 2009). Auf Basis der Daten werden CM-Verfahren wie Fehler-, Möglichkeits- und Einflussanalyse (Bertsche et al., 2009) oder graphische Verfahren wie BN (Ferreiro et al., 2010) zur Diagnose von Fehlern eingesetzt. Die CM-Verfahren werden momentan primär zur zustandsorientierten Instandhaltung eingesetzt (Reichel et al., 2009).

Da es eine Vielzahl von Sensoren gibt, ist es für jede Maschinengeneration festzustellen, welche Parameter überwacht werden müssen, welche Sensoren sinnvoll und an welchem Bereich der Maschine sie zu installieren sind. Dazu gibt es Verfahren wie eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) oder eine Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Gefährdungsanalyse (FMECA), um festzustellen, wo die erwarteten Schäden oder Symptome auftreten, um geeignete Sensoren zur Anzeige der Existenz bzw. der Entstehung zu identifizieren (DIN\_ISO\_17359, 2003). In der folgenden Tabellen nach (DIN\_ISO\_17359, 2003) ist beispielhaft die Zuordnung von Sensoren (Parametern) zu Maschinearten aufgelistet:

**Tabelle 2: Beispielhafte Zuordnung von Sensoren zu Maschinen nach DIN ISO 17359**

Sensoren	Maschineart						
	Elektromotor	Dampfturbine	Pumpe	Kompressor	Generator	Verbrennungskraftmaschine	Ventilator
Temperatur	x	x	x	x	x	x	x
Druck		x	x	x		x	x
Obere Druckstufe			x				
Druckverhältnis				x			
Luftstrom				x		x	x
Brennstofffluss						x	
Flüssigkeitsfluss		x	x	x			
Strom	x				x		
Spannung	x				x		
Widerstand	x				x		
Eingangsleistung	x		x	x	x		x
Ausgangsleistung	x	x			x	x	
Geräuschabstrahlung	x	x	x	x	x	x	x
Schwingungen	x	x	x	x	x	x	x
Ultraschalltechnik	x	x	x	x	x	x	x
Öldruck	x	x	x	x	x	x	x
Ölverbrauch	x	x	x	x	x	x	x
Tribologische Ölprobe	x	x	x	x	x	x	x
Antriebsmoment	x	x		x	x	x	
Drehzahl	x	x	x	x	x	x	x
Länge		x					
Wirkungsgrad		x	x	x		x	

Die x markieren die Zuordnung, hier sind gleichzeitig auch der wichtigsten Messeinrichtungen aufgeführt, wie Temperatur.

## 2.4 Wissensgenerierung auf Basis der Feedbackdaten

Entscheidend für den Wert von Wissen ist die semantische Abstimmung zwischen den Wissenslieferanten und dem Wissensnachfrager bzw. den speichernden und den wieder auslesenden technischen Systemen (Bodendorf, 2006). Dieser Umstand macht es erforderlich, dass eine Methode angewandt wird, die in der Lage ist, maschinell die Bedeutung

(Semantik) der Daten zu erfassen (Dengel, 2012). Das Ziel ist die Überwindung von semantischer Heterogenität, die sich beispielsweise in dem Vorkommen von Synonymen und Homonymen äußert, sowie ganz allgemein in der unterschiedlichen Begriffsbildung für unterschiedliche Datenquellen (Eckstein, 2011), genauso wie die Verarbeitung von fehlerhafter Eingabe.

Um eine Eindeutige semantische Zuordnung zu gewährleisten, sind insgesamt drei Ebenen (Stichwort „Semiotisches Dreieck“ (Eco, 2002)) zu durchlaufen (vgl. folgende Abbildung) (Helbig, 2008):

- dieselben Zeichen(-ausdruck) werden verwendet (wie „Schraube“ oder ein numerischer Wert),
- die Zeichen lassen sich zu Konzepten zuordnen → Zeicheninhalt (Identifizierung von „Schraube“ als „Bauteil“ oder 0,66 ist die gemessene Temperatur) und
- den Konzepten wird dieselbe Bedeutung beigemessen → Objekt (Eigenschaften der Schraube, wurde verbaut mit..., die gemessene Temperatur liegt im normalen Bereich).

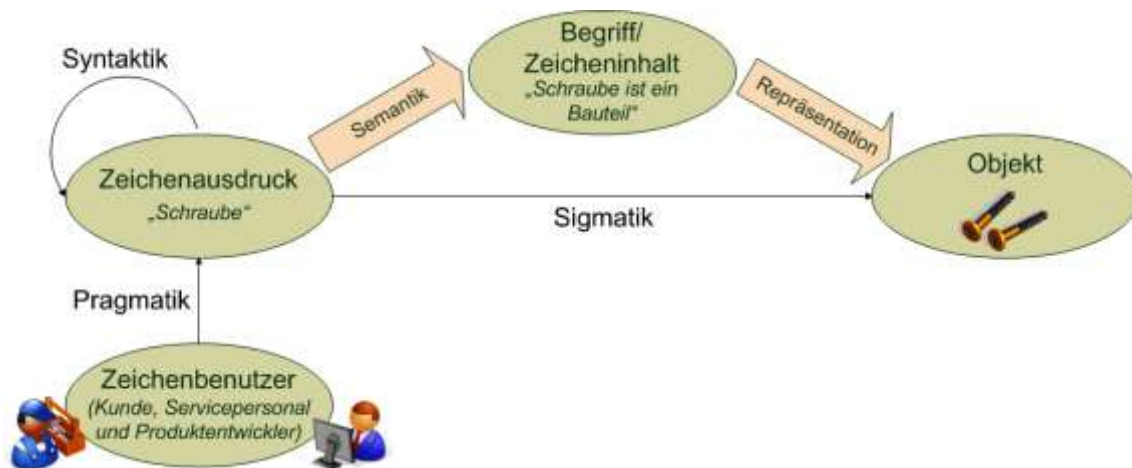


Abbildung 6: Semantische Zuordnung (Dienst et al., 2012)

Dabei ist der Zeichenausdruck abhängig von den Zeichenbenutzern, wie Kunde, Produktentwickler, etc. (*Pragmatik*) und den formalen Beziehungen zwischen den Zeichen (*Syntaktik*) (Eco, 2002). Die *Sigmatik* ist die Theorie, die die Beziehung zwischen dem Zeichenausdruck und den Objekten untersucht (Eco, 2002).

Zur Verwaltung, Entwicklung, Erschließung und Darstellung von Wissen aus Daten gibt es eine Vielzahl von Anwendungssystemen (Bodendorf, 2006). Knowledge Discovery ist die Gewinnung von Wissen aus dem Rohmaterial Daten, wobei die Daten in strukturierter oder unstrukturierter Form vorliegen können. Zur Analyse von strukturierten Daten eignen sich *Data Mining Verfahren* (Rudolph, 2008), zur Analyse von unstrukturierten Daten hingegen *Knowledge Discovery from Text (KDT)*, auch *Text Mining Verfahren* (Witte & Mülle, 2006) genannt. Bei der Wissensgenerierung aus unstrukturierten Informationen, gerade im Internet bzw. Intranet rückt Text Mining immer mehr in den Fokus (Ertel, 2013). Standardmäßige Fragestellungen sind in diesem Kontext, dass finden „*ähnlicher Texte in Suchmaschinen oder die Klassifikation von Texten*“ (z.B. Spam-Filter) (Ertel, 2013).



Beim Text Mining geht es nicht darum, lediglich Dokumente anhand von Anfragen aufzufinden, sondern aus einem einzelnen Dokument oder einem großen Satz von Dokumenten neues Wissen aufzudecken (Witte & Mülle, 2006). Hierzu gibt es eine Vielzahl an *statistischen oder maschinellen Lern- und Analyseverfahren* die angewandt werden können (Müller & Lenz, 2013). Im Fokus dieser Arbeit stehen die *Data Mining Verfahren* bzw. der *Knowledge Discovery from Databases – KDD Prozess*, aus der einfachen Begründung, dass die Daten strukturiert vorliegen.

KDD bezeichnet den Prozess, gültige, bisher unbekannte, verständliche und nützliche Informationen aus Datenbeständen zu gewinnen. KDD hat zur Aufgabe, implizit vorhandenes Wissen in umfangreichen Datenbeständen zu identifizieren und explizit zu machen (Gluchowski et al., 2008). Der Prozess des Gewinnens von Wissen aus großen Daten sowie dessen Darstellung und Anwendung wird als *Data Mining* bezeichnet (Ertel, 2013) und ist eine Stufe im Prozess des KDD (Chamoni & Gluchowski, 2006). Dem Data-Mining-Konzept fällt damit die Aufgabe eines formalen Mustergenerators zu, während das KDD-Konzept darüber hinaus Sorge zu tragen hat, dass die Muster durch den Anwender interpretiert werden und ihren Nutzen im betrieblichen Planungs- und Kontrollsystem entfalten können (Grob & Bensberg, 1999), (Hippner et al., 2011).

Häufig sind zu Beginn eines Projekts noch keine nutzbaren Daten vorhanden, so dass zunächst die Datensammlung geplant und durchgeführt werden muss (Runkler, 2010), die in erster Linie durch die Zielsetzung der Wissensentdeckung bestimmt wird (Gluchowski et al., 2008), (Piazza, 2010). Mit der Anwendung des durch einen KDD-Prozess entdeckten Wissens soll meist ein betriebswirtschaftliches Ziel erreicht werden, welches sich aus allgemeinen Problemstellungen ergibt. Dieses Ziel kann beispielsweise die Bewertung neuer Kunden anhand eines Prognosemodells sein oder eine Beschreibung, in welche Käufergruppen sich bestehende Kunden segmentieren lassen. Diese Beispiele zeigen bereits, dass unterschiedliche Typen von Zielsetzungen, nämlich Vorhersage und Beschreibung, für die Anwendung eines KDD-Prozesses existieren. Eine erfolgreiche Wissensentdeckung bedingt neben dem Verständnis der zu Grunde liegenden Zielsetzung eine präzise Ableitung und Formulierung der Aufgabenstellung, die als Basis für die weiteren Prozessphasen dient. Hierbei wird zunächst festgelegt, welche Art von Wissen entdeckt und wie es angewendet werden soll (Chamoni & Gluchowski, 2006). Zur Datenvorbereitung gehört weiter, dass aus den teilweise unübersichtlichen Daten geeignete Merkmale generiert und die interessanten Daten ausgewählt werden (Runkler, 2010). Dazu gehört auch die Verbesserung der Datenqualität, z. B. durch Ergänzung fehlender Attributwerte oder Beseitigung von Duplikaten (Gluchowski et al., 2008).

Als zentrale Prozessphase bei diesem idealtypischen KDD-Durchlauf ist die Analyse zu verstehen, bei der die potenziell interessanten Beziehungsmuster (Regelmäßigkeiten, Auffälligkeiten) aus dem Datenbestand herausgefiltert und durch logische bzw. funktionale Abhängigkeiten beschrieben werden (Gluchowski et al., 2008). Diese Phase wird auch mit Data Mining gleichgesetzt und lässt sich sehr frei als Datenmustererkennung übersetzen (Hippner et al., 2011). Ein Beispiel für ein Mustern wäre: *Wenn Produkt Nr. x gekauft wird, dann wird auch Produkt Nr. y mit einer Wahrscheinlichkeit von z % gekauft* (Grob & Bensberg, 1999).

---

Die Gegenstände des Data Mining sind große strukturierte Bestände numerisch-, ordinal- oder nominalskalierteter Daten, in denen interessante, aber schwer aufzuspürende Informationen verborgen sind (Karagiannis & Rieger, 2006). Data Mining entstand um die Mitte der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts als eigenes Gebiet und hat seitdem eine stürmische Ausbreitung erfahren (Cordts et al., 2011). Der Begriff „Data Mining“ kommt aus dem Bergbau (Mining), wo nach wertvollen Rohstoffen gesucht wird (Cordts et al., 2011). Es ist die nicht triviale und automatische Suche nach dem verborgenen Wissen in den Massendaten des Unternehmens (Karagiannis & Rieger, 2006). Nicht-Trivial bedeutet, dass beim Data Mining – im Gegensatz zur Verwendung herkömmlicher Datenwerkzeuge – komplexe Methoden aus dem Bereich künstliche Intelligenz, der wissensbasierten Systeme, der Statistik und des maschinellen Lernen verwendet werden (Karagiannis & Rieger, 2006). Die auf sehr große Datenmengen mit vertretbarem Aufwand anwendbar sein sollten (Ertel, 2013). Dabei spielen Visualisierungsverfahren eine große Rolle, aber auch reine Analysemethoden (Runkler, 2010). Data Mining lässt sich allgemein einsetzen zum Clustering sowie zur Klassifikations-, Assoziations- und Abweichungsanalyse (Strohmeier, 2008).

Im Kontext dieser Arbeit ist auf Basis der Feedbackdaten eine Wissensrepräsentationsmethode (WRM) als Diagnosemodell zu generieren, zur Beantwortung von Fragen wie *„Von welchen Parametern hängen die Störungen ab?“* oder *„Wie verändert sich die Wahrscheinlichkeit für den Defekt z.B. eines Lagers, wenn die Pumpe in einem Gebiet mit hoher Umgebungstemperatur betrieben wird?“*. Grundlage für die Wissensgenerierung und eine anschließende Visualisierung von Wissen ist eine Wissensrepräsentation. Um Wissen beschreiben zu können, müssen syntaktische und semantische Regeln existieren, die eine Wissensrepräsentationssprache bilden. Werden zudem Schlussfolgerungstechniken angewendet, liegt eine WRM vor (Beierle & Kern-Isberner, 2008).

WRM werden im Wesentlichen in deklarative und prozedurale Methoden unterteilt (Helbig, 2008). Deklarative Wissensrepräsentationsmethoden beschreiben Sachverhalte in strukturierter Art und Weise. Hierin sind keine Informationen über Konstruktion und Gebrauch des Wissens enthalten. Sie werden z.B. in Form von Datenbanken oder Semantischen Netzen umgesetzt. Prozedurale Wissensrepräsentationsmethoden hingegen beschreiben Verfahren zur Konstruktion, Verknüpfung und Anwendung von Wissen (Beierle & Kern-Isberner, 2008). Zu Ihnen gehören spezifische Programme oder Agentensysteme. Eine Strukturierung der bekanntesten Wissensrepräsentationsformen ist in Abbildung 7 veranschaulicht.

Ein häufig zitierter Nachteil prozeduraler Wissensrepräsentationsformen ist die Vermischung von anwendungsspezifischem Wissen und allgemeinem Problemlösungswissen (Neubach, 2010). Das hat zur Folge, dass die Flexibilität und die Wartung solcher Systeme zeitaufwendig und komplex ist (Haun, 2007). So ist bei einer Erweiterung der Wissensbasis (spezielle Datenbank) ein direkter Eingriff in den Programmcode notwendig (Loudon et al., 2009). Daher sind die prozeduralen Methoden nicht geeignet zur Umsetzung im Kontext des FAS, da davon auszugehen ist das der User, der Produktentwickler über keine Programmierkenntnisse verfügt. Auch ist davon auszugehen, dass aufgrund der Produkt

Vielfalt eine ständige Erweiterung der Wissensbasis automatisiert erfolgen muss ansonsten wäre der Administrationsaufwand zu hoch.

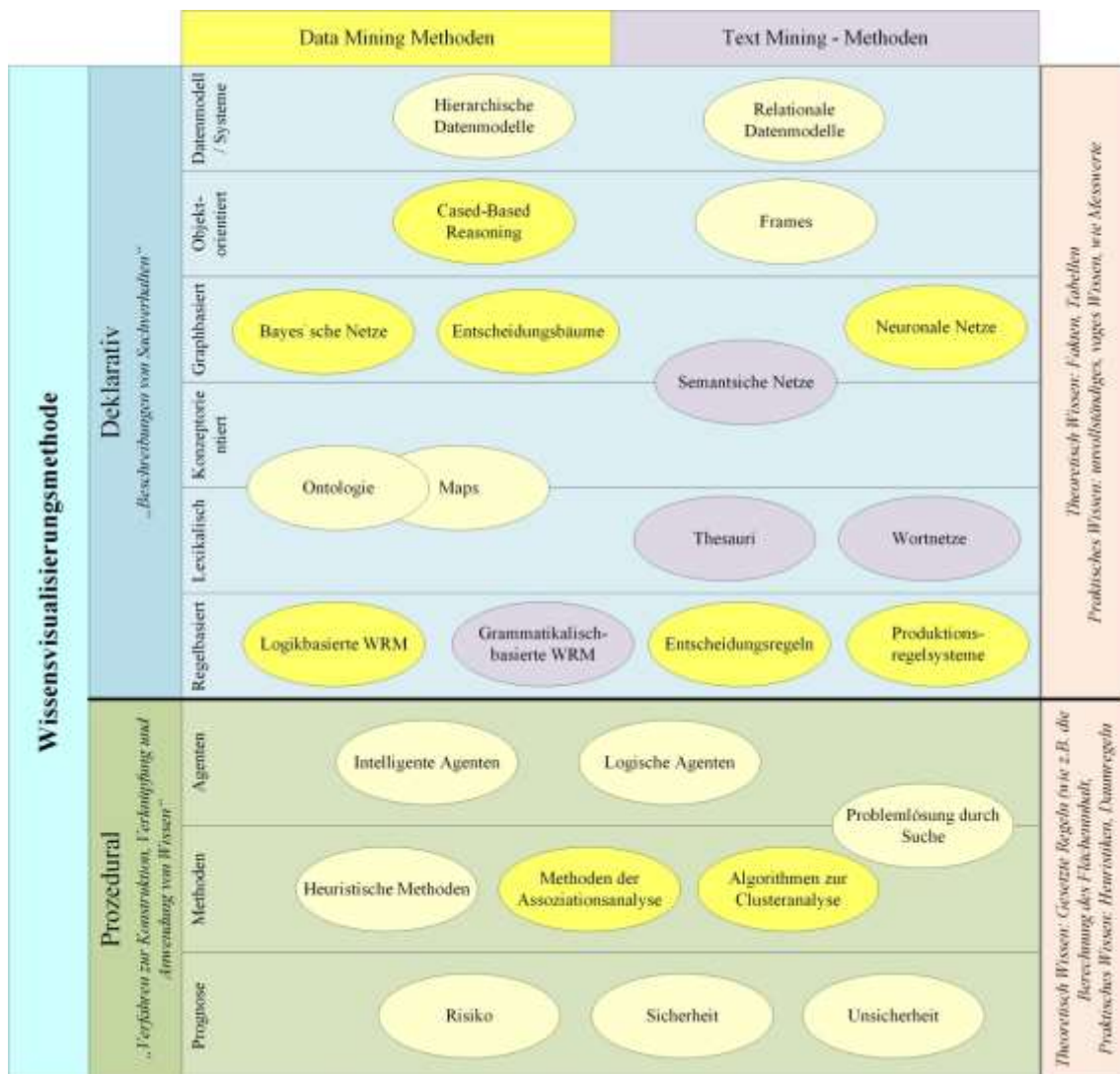


Abbildung 7: Wissensrepräsentationsformen in Anlehnung an (Helbig, 2008), (Beierle & Kern-Isberner, 2008), (Russell & Norvig, 2012)

Bei Deklarativen Wissensrepräsentationsformen, gibt es eine deutliche Trennung zwischen allgemeinem Problemlösungswissen und anwendungsspezifischen Wissen. Die *Regelbasierte Systeme* bspw. bestehen aus einer Menge von Fakten, Regeln und Inferenzmechanismen (Russell & Norvig, 2012). Eine Regel eines solchen Systems besteht im Allgemeinen aus einer *Prämisse* (dem IF-Teil einer Regel) und einer *Konklusion* (dem THEN-Teil einer Regel) (Beierle & Kern-Isberner, 2008), (Bodendorf, 2006). Die Domänenunabhängigen Inferenzmechanismen (Algorithmen zur Ableitung neuer Fakten durch Schlussfolgerung) sind in einer Problemlösungskomponente enthalten, während das eigentliche Domänenwissen getrennt in einer Regeldatenbank gehalten wird. Durch deklarative Wissensrepräsentationsformen werden Fakten und deren Beziehungen untereinander abgebildet, um auf dieser Basis zu neuem Wissen zu gelangen (Mertens, 1990). In Bezug auf den Aspekt Interpretierbarkeit lassen sich Schlussfolgerungen für den Anwender transpa-

rent, im Gegensatz zu nicht-deklarativen Ansätzen, nachvollziehen (Russell & Norvig, 2012). Für das FAS kommen daher nur die deklarativen Methoden in Frage, um den Entwickler bei der Verbesserung zu unterstützen, was der Kernaufgabe von Assistenzsystemen entspricht.

Assistenzsysteme sind gerade bei modernen Automobilen sehr gut bekannt, wo der Fahrer unterstützt wird in verschiedenen Situationen wie die Scheibenwischer schalten sich bei nasser Windschutzscheibe von selbst ein oder die Einparkhilfe in Form von akustischen Signalen bis hin zum alleinigen einparken (Barthelmeß & Furbach, 2012).

*„Ein Assistenzsystem ist eine Anordnung von Komponenten mit dem ausdrücklichen Ziel, Unterstützung bei einer bestimmten Aufgabe zu gewähren, gesteuert von einer informationstechnischen Einheit, die ausreichend komplex gesteuert ist, um eine Verarbeitung von Informationen oder eine entsprechende Anpassung des Systemverhaltens zu ermöglichen.“ (Beetz, 2006).*

*Die Aktualität dieses Forschungsthemas zeigt sich u.a. in dem Verbundprojekt NovaMille werden Benutzer, Instandhalter unterstützt werden durch Assistenzsysteme bei der Bereitstellung von Informationen und bei der Kommunikation zwischen den Mitarbeitern (Bandow et al., 2007). Ziel von NovaMille ist es, markt- und technikbezogene Innovationspotenziale bei Unternehmen an der Schnittstelle Dienstleister Kunde zu identifizieren und zu realisieren (Bandow et al., 2007). Das Assistenzsystem, hier Wissensplattform genannt, soll das explizite Wissen der Instandhalter zur Verfügung stellen und Informationen in Form von Handlungsalternativen bereitstellen (Bandow et al., 2007).*

*Weiterhin wurde innerhalb der Dissertation von (Stöckert, 2011) ein intelligentes Assistenzsystem entwickelt, das den Produktentwickler die Erfüllung rein formaler Anforderungen in der Produktentwicklung vollständig abnimmt und die Konformität selbstständig gewährleistet. Mit dem entwickelten System ist eine kontextsensitiven Informationsbereitstellung verbunden, es kann zudem als Basis für Weiterentwicklungen zur Informationsbereitstellung beispielsweise im Rahmen des Wissens- oder Innovationsmanagements dienen (Stöckert, 2011).*

Im Rahmen dieser Arbeit wird, der Produktentwickler durch das FAS unterstützt durch die Bereitstellung von Wissen über das Nutzungsverhalten/ -kosten von Maschinen zur Verbesserung der aktuellen Produktgeneration.

### 3 Entwurf des Feedback Assistenz Systems

Zum Entwurf eines Systems und dessen umzusetzende Funktionen gibt es verschiedene Werkzeuge (Balzert, 2009), hier erfolgt die Beschreibung durch Anwendungsfälle bzw. Use Cases (Brandt-Pook & Kollmeier, 2008). Die Funktionen des FAS können nur in bestimmten Phasen der Produktverbesserung genutzt werden. Zu diesem Problem sind u.a. Industrieinterviews bei Siemens AG oder Renk AG durchgeführt worden, auf deren Basis die folgenden Anwendungsfälle erstellt wurden (Dienst et al., 2010), (Abramovici et al., 2012):

- Erfassung und Aggregation der Daten aus der Produktnutzungsphase in einem Datenhaltungsmodul.
- Auswahl und Selektion der verdichteten Daten zur Analyse des bisherigen Produktverhaltens, zum Auslösen der Produktverbesserung und Analyse und Überprüfung der Anforderungen.
- Diagnose von Produktausfällen und Identifikation von Produktverbesserungspotentialen.
- Prognose des zukünftigen Produktverhaltens zu den verschiedenen möglichen Charakteristika (wie Material) einer Verbesserungsalternative.
- Entscheidungsunterstützung zum Auffinden der besten Alternative zur Produktverbesserung.

#### 3.1 Anwendungsfälle des FAS

In diesem Abschnitt werden die Anwendungsfälle prozessorientiert im Detail beschrieben, in Anlehnung an die Modellierung mittels ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK) (Becker et al., 2007).

##### ***Anwendungsfall 1: Datenerfassung und -haltung***

Der *Anwendungsfall 1* betrifft die Datenerfassung, für die das FAS geeignete Methoden benötigt, anhand derer es möglich ist, die Feedbackdaten aus den verschiedenen Datenquellen bei Kunden und Service in ein zentrales Datenhaltungsmodul zu transferieren. Die unterschiedlichen Datenquellen sind u.a. lokale Datenbanken, ERP, CM-/ PLM-Systeme oder Datenformate (wie CSV, TXT,...). Dies hat sich in den Interviews bei den Firmen Siemens AG und Renk AG und anhand einer Studie bei der Firma Friedr. Lohmann GmbH ergeben. Die Datenquellen bestimmen gleichzeitig die Informationsflüsse (Abbildung 8) zwischen Datenerzeuger und FAS.

Die Daten werden während der Produktnutzungsphase generiert (*Produktnutzungsebene*). In dieser Ebene findet die Datenerzeugung und -erfassung von Service, Maschinen (Sensoren) und dem Qualitätsmanagement statt (Dienst et al., 2011). Für eine eindeutige Zuordnung von Feedbackdaten zu Produktinstanzen ist es erforderlich, dass eine *Seriennummer* vorhanden ist. Daher muss bei jeder Übertragung die *Seriennummer* der Maschine mit übermittelt werden. Die *Seriennummer* wird bereits während *der* Produktentwicklung bei der Erstellung eines Produktmodells vergeben. *Produktmodelle* haben die Zielsetzung,

Produkte mit ihren für den gesamten Lebenszyklus relevanten Informationen digital abzubilden (Paul & Paul, 2008). Ein Produktmodell besteht aus den Komponenten Produktstammsatz und Produktstruktur sowie Dokumenten und Dokumentenstrukturen (Eigner & Stelzer, 2012). *Produktstrukturen* werden häufig auch als Stücklisten bezeichnet und beschreiben die Zuordnung von Produktkomponenten (Material, Halbzeug, Einzelteil, Baugruppe, Erzeugnis) zueinander (Eigner & Stelzer, 2012). Bei den *Stammdaten* werden u.a. die Bezeichnung und die Seriennummer der Produkte angelegt. Die Daten werden in Produktdatenmanagement (PDM)- Systemen verwaltet und darauf aufbauend in PLM - Systemen (Sendler, 2009), (Sauter, 2011). Zudem werden in CRM -Systemen Daten über die Kunden, z. B. Adresse, Kaufdatum, oder auch Servicedaten, verwaltet.

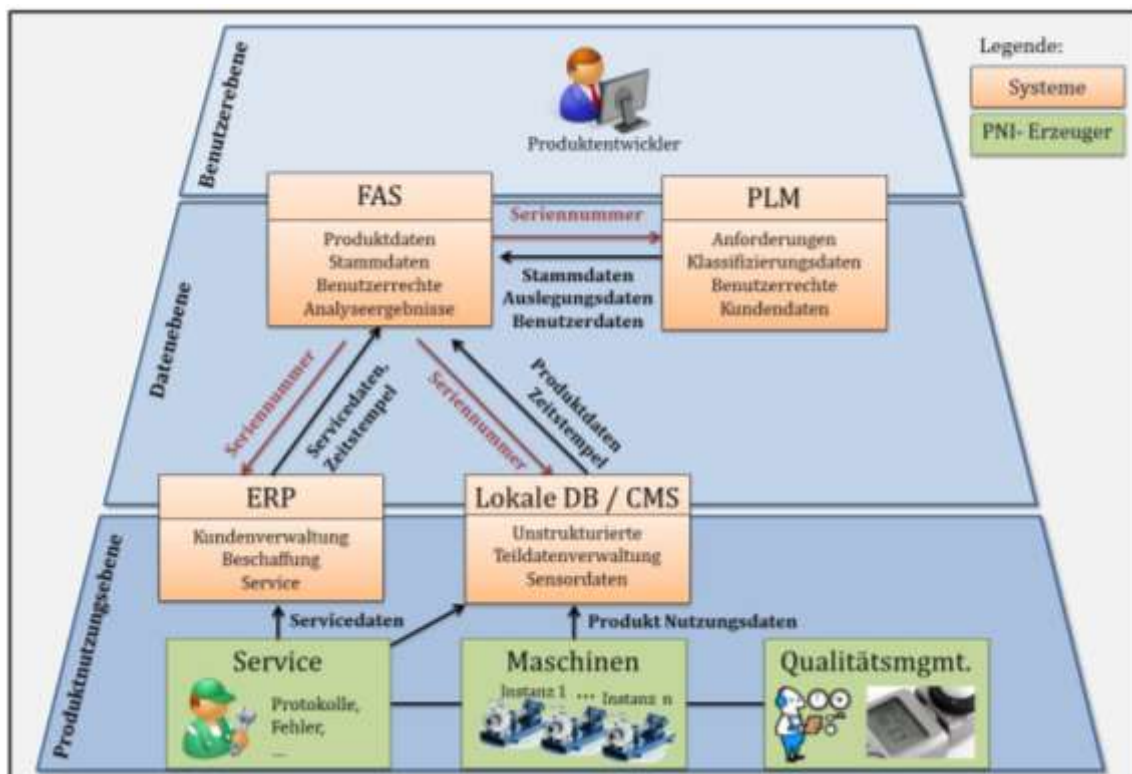


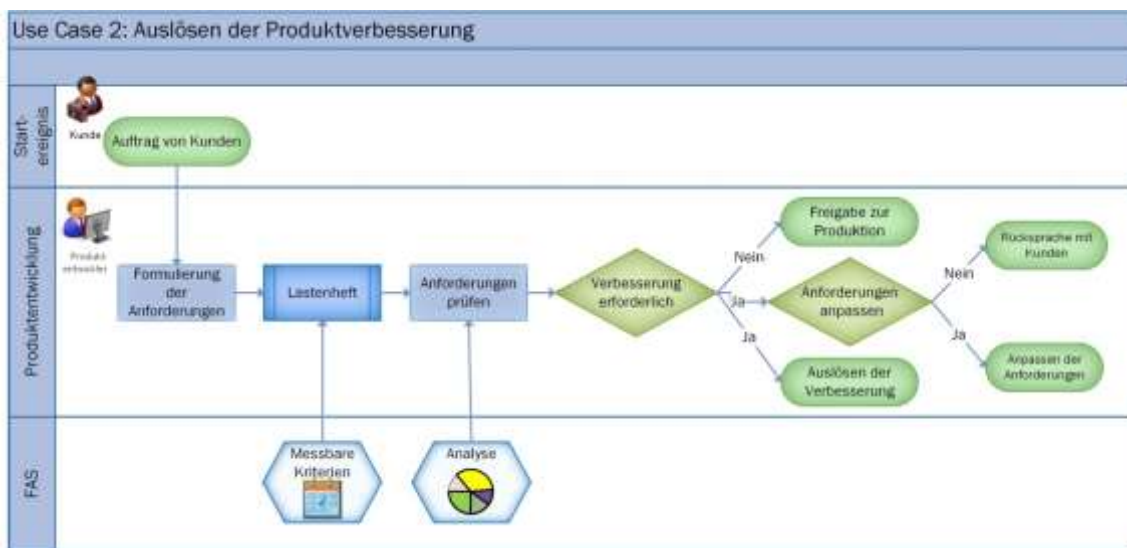
Abbildung 8: Informationsfluss zw. Feedback Erzeugern und Systemen (Dienst et al., 2011)

Die Feedbackdaten, Stammdaten und Kundeninformationen werden in das FAS geladen und verwaltet (*Datenebene*) (Dienst et al., 2011). Für die Übertragung der Feedbackdaten in die Datenbank (DB) ist ein Modul zur Datenübertragung und Aggregation umzusetzen, wodurch das FAS mit tagesaktuellen Daten versorgt wird. Für diese Daten ist ein Datenmodell zu entwerfen. Bei der Datenübertragung ist es verpflichtend, dass die Seriennummer und ein Zeitstempel (Erzeugungsdatum der Daten) mit übertragen werden. Wenn das nicht der Fall ist, können die Daten nicht in der Datenbank verwaltet werden. Auch werden die Analyseergebnisse der wissensbasierten Methoden in dem Datenmodul verwaltet. Der Produktentwickler kann dann später auf das FAS Zugriff nehmen, um Analysen zu starten bzw. durchzuführen (*Zugriffsebene*). Er wird dabei allerdings keinen Zugriff auf die Datenbasis haben.

**Anwendungsfall 2: Auslösen der Produktverbesserung**

Das Assistenzsystem unterstützt innerhalb der Produktverbesserung die Phase „Analysieren“. Am Anfang steht dabei ein Kundenauftrag für eine neue Produktinstanz an den Hersteller. Nun ist zu bestimmen, ob das Produkt (*Produktgeneration<sub>n</sub>*) direkt produziert werden kann oder ob vorher eine Verbesserung der *Produktgeneration<sub>n</sub>* erforderlich ist.

Das geschieht mittels der Anforderungen, die in einem Lastenheft vorliegen. Eine Anforderung ist eine Fähigkeit, die das Produkt haben soll oder muss. Im Allgemeinen wird diese in eine oder mehrere Eigenschaften des Produkts übersetzt (Holzbaur, 2007). Einfache Eigenschaften (Farbe, Gewicht, Länge) sind durch Messprozesse definiert (Holzbaur, 2007), (Lindemann, 2009). Komplexere Eigenschaften müssen entsprechend beschrieben werden (Holzbaur, 2007). Nach der (VDI\_2519, 2001) müssen die Anforderungen quantifizierbar (z.B. Zuverlässigkeit > 95%) und prüfbar sein. Die quantifizierbaren Anforderungen können partiell direkt gemessen (z.B. Fördermenge) oder als Kombination mehrerer Feedbackdaten (z.B. Wirkungsgrad) bestimmt werden. Eine Produktverbesserung wird erforderlich, falls ein Produkt die gestellten Anforderungen nicht oder nicht mehr erfüllt. Gründe hierfür können sein, dass sich Anforderungen von Kunden stetig weiterentwickeln oder z.B. durch neue Normen und Gesetze ändern bzw. neu hinzukommen (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013).



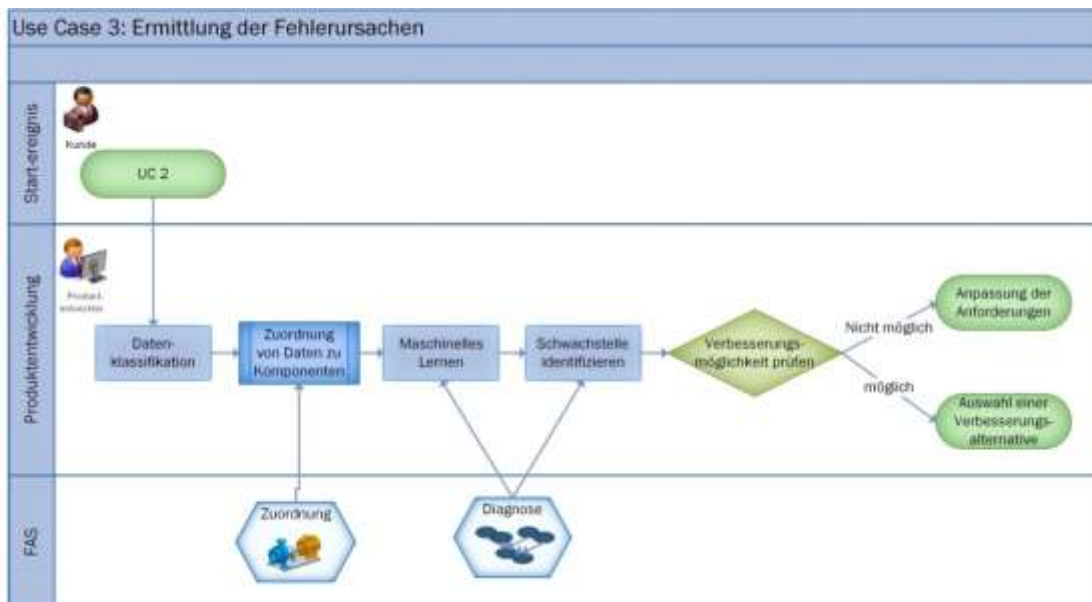
**Abbildung 9: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 2 (Dienst et al., 2010)**

Die Überprüfung der Anforderungen erfolgt durch die Anwendung des FAS mittels einer statistischen Analyse, die der Produktentwickler starten kann (Dienst et al., 2010). Hier können zu einer bestimmten Produktgeneration und ggf. auch Instanz relevante Kosten oder Zeit Kennzahlen berechnet werden. Die Abfragen sind vordefiniert, um eine schnelle und einfache Abfrage direkt aus den Daten innerhalb des Datenmodells zu gewährleisten. Nicht erfüllte Anforderungen werden geändert oder neue aufgenommen. Mittels der statistischen Analyse ist die Entscheidung zu treffen, ob eine Produktentwicklung erforderlich ist oder ob die bestehende Produktgeneration den Anforderungen des Kunden entspricht (vgl. Abbildung 9).

Wenn eine Produktverbesserung erforderlich ist, ist in der Analysephase der Produktentwicklung das Lastenheft für die *Produktgeneration<sub>n+1</sub>* zu aktualisieren, die Hauptfunktionen der *Produktgeneration<sub>n</sub>* zur *Produktgeneration<sub>n+1</sub>* dürfen hingegen im Rahmen einer Produktverbesserung nicht geändert werden. Für die Erstellung des neuen Lastenheftes *n+1* sind zudem die Anforderungen insgesamt zu aktualisieren. Dazu führt der Produktentwickler eine quantitative Bewertung der Anforderungen des bestehenden Lastenheftes *n* durch, worin er die Analyseergebnisse einfließen lässt. Der Produktentwickler erhält in diesem Anwendungsfall nicht nur Informationen zu den Anforderungen, die geändert werden müssen, sondern kann ggf. auch direkt die Komponenten identifizieren, die für die Erfüllung der neuen Anforderungen geändert werden müssen.

**Anwendungsfall 3: Diagnose von Produktausfällen und Identifikation von Produktverbesserungspotentialen.**

Nachdem nun die Anforderungen analysiert und aufgestellt wurden, wird nun die nächste Phase „Konzipieren“ in der Produktentwicklung gestartet. Hier soll nun Verbesserungspotential für die nächste Produktgeneration aufgedeckt werden, das den Anforderungen entspricht. In dem *Anwendungsfall 3* geht es nun darum, anhand der Daten Wissen zu generieren, das dabei hilft, Schwachstellen der aktuellen Produktgeneration aufzudecken, um diese nach Möglichkeit in der nächsten Generation zu vermeiden. Der erste Schritt dazu ist, die Daten, die von einer Produktgeneration erfasst wurden, zu den einzelnen Komponenten der Maschine zuzuordnen, die eine Aussage zum Verhalten zulassen (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 3 (Dienst et al., 2010)**

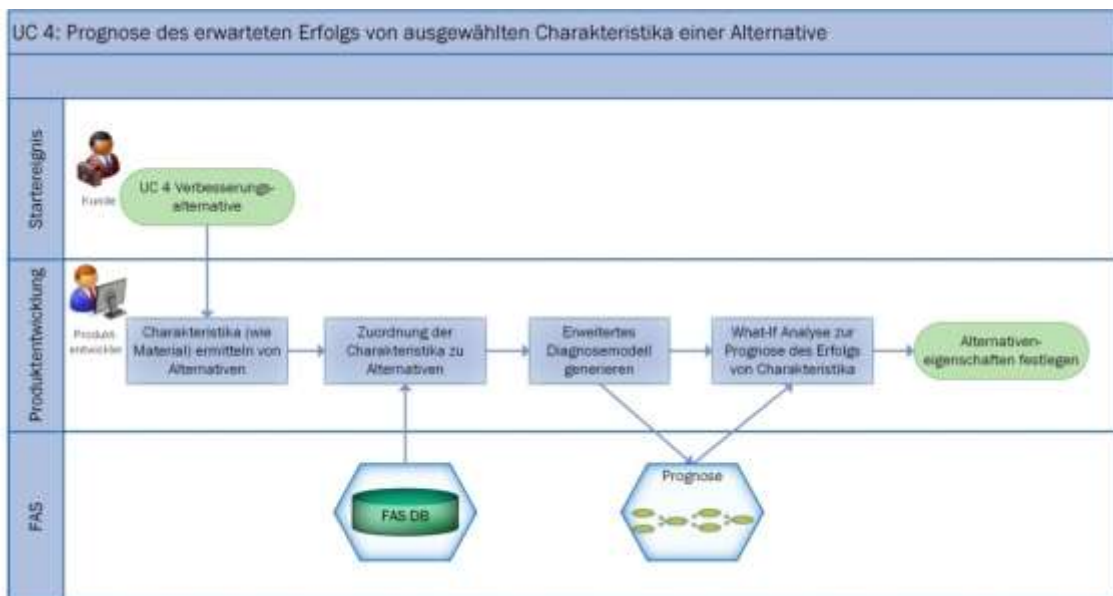
Anhand dieser Vorauswahl wird sodann aus den betreffenden Daten das Diagnosemodell automatisch generiert, um so die Verbesserungsmöglichkeiten abzuleiten (Dienst et al., 2010). Dabei ist es wichtig, dass nicht nur die Daten einer Instanz zur Erstellung des Diagnosemodells herangezogen werden, sondern die aggregierten Daten aller Instanzen einer Generation. Dadurch wird gewährleistet, dass die abzuleitenden Aussagen allgemeingültig



und objektiv sind. Das ist wichtig, da es das Ziel ist, eine komplette Generation zu verbessern, nicht nur eine bestimmte Instanz. Abschließend ist dann eine Auswahl der Verbesserungsmöglichkeiten nach zwei Aspekten möglich, zum einen zur Fragestellung „*Was ist die Fehlerursache?*“, z.B. eine erhöhte Schwingung, womit die Richtung zu Verbesserung vorgegeben ist, und „*Welche Komponente eignet sich am besten für die gegebenen Umweltumstände?*“, so kann z.B. analysiert werden, welche Pumpe in einer Wüste bei erwarteter hoher Umgebungstemperatur die geringste Fehleranfälligkeit aufweist.

**Anwendungsfall 4: Prognose**

Wenn eine Alternative feststeht, gibt es noch verschiedene Eigenschaften, die festgelegt werden müssen, um später eine möglichst erfolgreiche Nutzung zu erreichen. Die Eigenschaften sind die Details bei der Umsetzung der Alternative, wie der eingesetzte Werkstoff (wie Stahl vs. Aluminium) oder die Art der Verbauung (wie Form oder Verbindungen) (Abbildung 11).



**Abbildung 11: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 4**

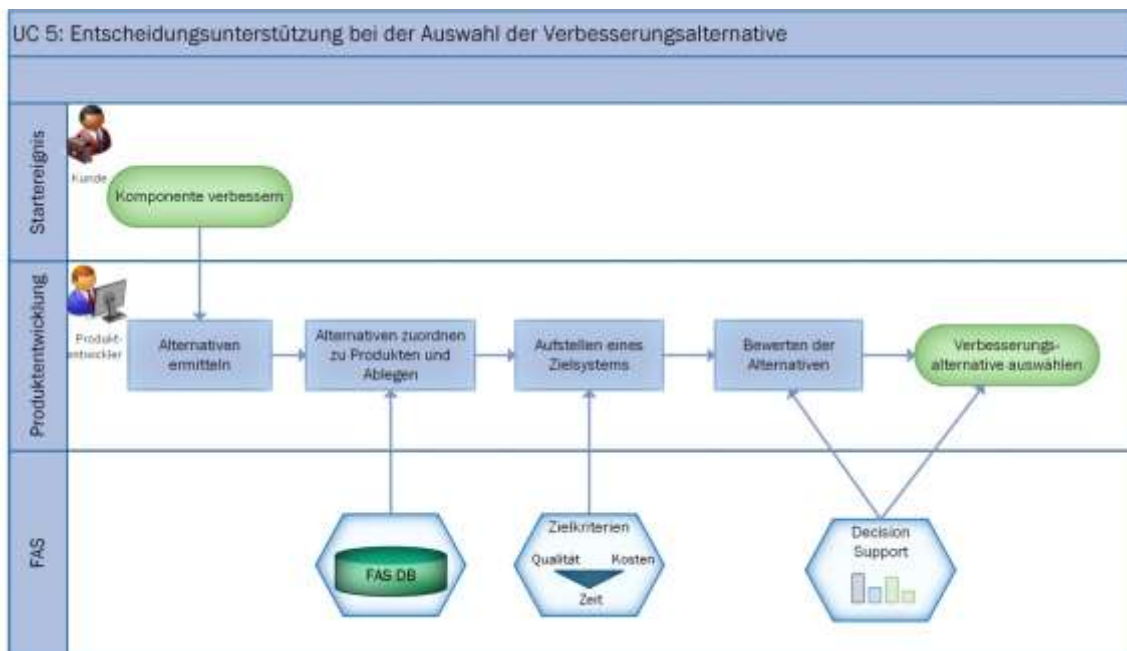
So sind zu den gegebenen Alternativen die Eigenschaften zu bestimmen, die wiederum verbunden mit den Feedbackdaten gemessen werden können, um so ein erweitertes Diagnosemodell für eine Prognose zu generieren (Abramovici et al., 2012). In diesem werden dann zusätzlich zu den Feedbackdaten auch die Eigenschaften eingebunden, um berechnen zu können, ob und wie die Auswahl einer bestimmten Eigenschaft Einfluss auf das Verhalten der Produktgeneration (z.B. die Ausfallwahrscheinlichkeit) hat. Am Ende soll die Auswahl der erfolgsversprechenden Eigenschaften einer Alternative stehen. Dabei ist zu beachten, dass es sich hier nicht um definitiv gesicherte Entscheidungen handelt.

**Anwendungsfall 5: Entscheidungsunterstützung**

Während der Entwurfsphase wird dem Produktentwickler die Möglichkeit gegeben, Komponenten (insbesondere Zukaufteile und Variantenteile) aus einer hierarchischen Struktur vorhandener Komponenten auszuwählen. Die Komponenten werden dafür klassifiziert

(z.B. wird die Komponente „Radialkreispumpe“ der Kategorie „Pumpen“ zugeordnet) und nach Funktionsweise und Bauart in verschiedene Unterkategorien unterteilt (z.B. Radialkreispumpe mit Anschluss nach DIN oder kundenspezifischer Anschluss). Die Anzahl der Hierarchieebenen ist dabei von den Komponenten abhängig. Auf der untersten Hierarchieebene sind die einzelnen Instanzen der ausgewählten Komponente nebst den aufgenommenen Betriebsdaten (z.B. die Betriebstemperatur, der Haltedruckhöhe) aufgeführt.

Das FAS soll nun bei der Auswahl der besten Alternative eingesetzt werden (Abramovici et al., 2012). Dazu müssen die zu einem Produkt zugeordneten Alternativen auch in der DB vorliegen, damit das FAS auf sie zugreifen kann, vgl. Abbildung 12.

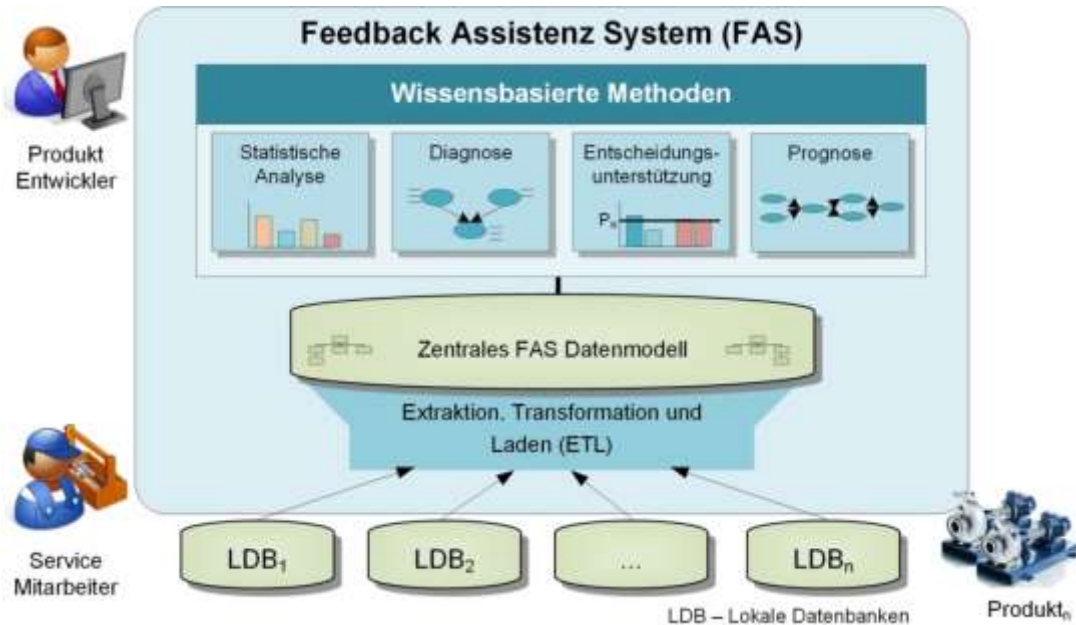


**Abbildung 12: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 5**

Sodann ist es erforderlich, die zur Verfügung stehenden Alternativen nach den Zielsetzungen aus der Produktentwicklung zu bewerten. Die Zielsetzung allgemein lässt sich in die Kategorien Qualität, Kosten und Zeit einteilen, die wiederum in verschiedene Kriterien unterteilt werden können. Hier interessieren nur die Kriterien, die Anhand der Feedbackdaten berechnet werden können, wozu auch die Ergebnisse der Anwendungsfälle 2 und 3 herangezogen werden sollen. Diese Kriterien müssen ermittelt werden, um dann die Alternativen bewerten zu können. Hierzu ist wiederum eine Bewertungsmethode (wie Nutzwertanalyse) aus der Entscheidungstheorie auszuwählen und umzusetzen. Der Vergleich ist dabei abhängig von der Alternative, die zurzeit in der Nutzung ist, da es darum geht, eine bessere als diese aufzudecken. Das Ziel wird es sein, die fünf besten Alternativen für den Produktentwickler zu visualisieren, einschließlich ihres Abschneidens bei der Zielerreichung. Darauf aufbauend kann der Produktentwickler dann eine Alternative auswählen.

### 3.2 Festlegung der Systemarchitektur

Anhand der Anwendungsfälle wird nun die Systemarchitektur des FAS festgelegt, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 13: Konzeptbild des FAS zur Entscheidungsunterstützung in der Produktverbesserung**

Zuerst ist die Datenerfassung und Verwaltung des FAS zu realisieren, sodass die notwendige Basis für die darauf aufsetzenden Methoden zur Analyse und Visualisierung gegeben ist. Zur Umsetzung dieses Schrittes werden Data Warehouse (DWH) Technologien angewandt. Diese besitzen die für das FAS notwendigen Kerneigenschaften, die Daten aus verschiedenen Quellen in eine Datenbasis zu transferieren und dort große Datenmengen zu verwalten, um sie dann als entscheidungsrelevante Informationen bereit zu stellen. DWH sind zudem Browser-basiert, sodass eine Ankopplung an bestehende IT-Systeme des Produktentwicklers leicht zu realisieren ist, im Gegensatz zu einer Erweiterung der bestehenden Systeme, die von Betriebsexternen sehr schwer anpassbar sind.

Der nächste Schritt ist der Einsatz wissens- und entscheidungsbasierter Methoden und Strategien zur Strukturierung und Verdichtung der Daten, um so dem Produktentwickler anwendbares Wissen bereitzustellen. Dabei gibt es zwei Schwerpunkte bei dem Einsatz der Methoden, zum einen die *Analyse der aktuellen Situation* (Produkt<sub>n</sub>) und zum anderen die *Entscheidungsunterstützung bei der Verbesserung der nächsten Generation* (Produkt<sub>n+1</sub>).

Für den ersten Schwerpunkt werden auf die Feedbackdaten die folgenden zwei Module angewandt:

- eine *Analyse* zur Visualisierung von Kennzahlen. Der Produktentwickler kann diese Methode zur Überprüfung der Anforderungen nutzen und feststellen ob eine Verbesserung erforderlich ist. Dies wird mittels Diagrammen am Bildschirm (*Dashboards*) realisiert.

- b) eine Data Mining Methode zur *Aufdeckung von Fehlerursache*. So wird aus den Feedbackdaten mittels maschinellen Lernens eine Diagnosemethode generiert, wo durch die Anwendung einer What-If Analyse Wissen abgeleitet werden kann. Dabei wird ein Zustand auf 100% gesetzte (z.B. Defekt eingetreten), anschließend können Rückschlüsse auf die wahrscheinlichsten Ursachen gezogen werden

Die Ergebnisse sind sodann zu erweitern für den zweiten Schwerpunkt, um Strategien zur Entscheidungsunterstützung:

- c) Die *Bewertung der Verbesserungsalternativen*. Dazu ist ausgehend von dem aktuell betrachteten Produkt (100% Lösung) eine automatische Bewertung und Darstellung der Alternativen durchzuführen. Die Bewertung erfolgt nach den Zielsetzungen der Produktentwicklung, wobei sich die Kriterien aus Kosten, Zeit und Qualität zusammensetzen, die gegenseitige Wechselwirkungen aufweisen. Dabei besteht das Ziel, die Kriterien anhand der Feedbackdaten zu bestimmen, sodass sich die verschiedenen Alternativen bereits in der Nutzung befinden müssen, wie eine Maschinenkomponente.
- d) eine *Prognose* zu dem erwarteten Erfolg der verschiedenen Ausprägungen (wie verschiedene Materialien) der Alternativen, mittels einer Erweiterung der in b) aufgestellten Diagnosemethode. So gibt es zu jeder Alternative verschiedene Charakteristika, beispielsweise welches Material verwendet wird. So kann hier mittels What-If Analyse geprüft werden, wie der erwartete Erfolg bei den verschiedenen möglichen Charakteristika in Abhängigkeit von den im Betrieb gegebenen Umgebungsparametern (wie erwartete Temperatur) aussieht.

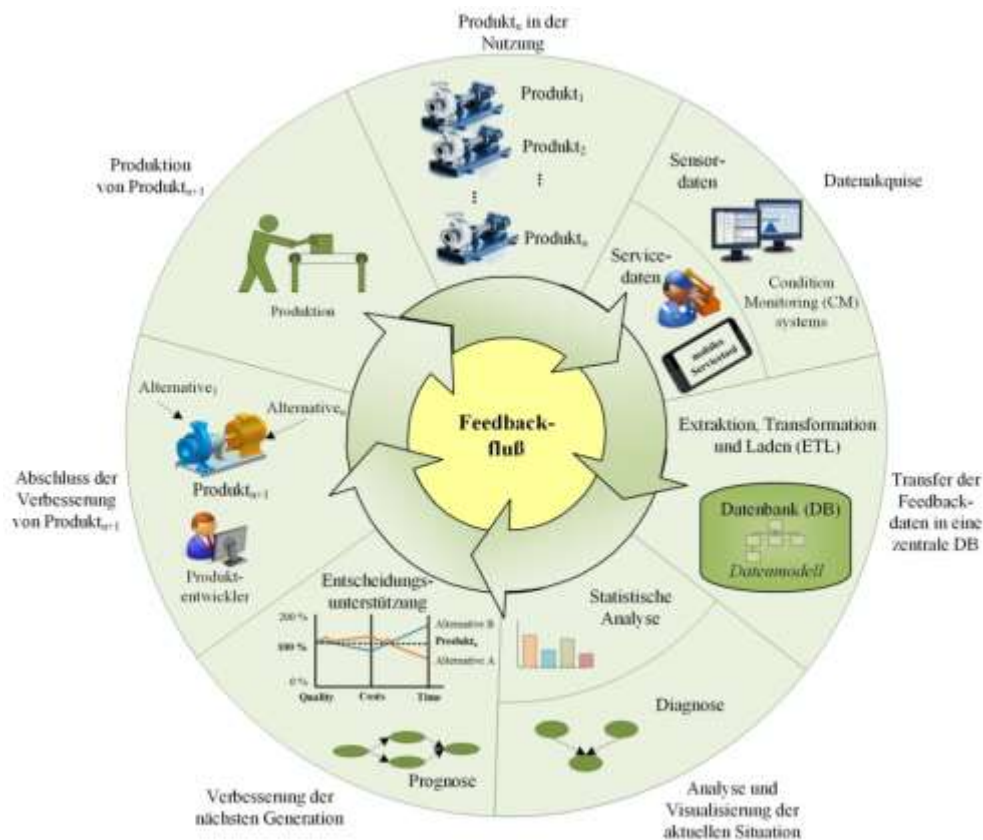


Abbildung 14: Feedbackfluss des Assistenz System (Dienst et al., 2014)

Bei einem Betrieb des FAS über einen längeren Zeitraum ist es möglich die gefundenen Verbesserungen mittels der zuvor beschriebenen Methoden zu evaluieren. Somit kann der Datenanreicherungsprozess das FAS als ein Zyklus betrachtet werden, der immer weiter geführt wird, da die umgesetzten Verbesserungsalternativen die Feedbackquellen von morgen sind vgl. Abbildung 14. Das FAS wird somit den Verbesserungsprozess effektiver gestalten, sodass die Qualität der Folgegeneration und die Haltbarkeit optimiert werden.

Das hier erstellte Konzept (Abbildung 13) ist in dem DFG Projekt WiRPro angewandt und erprobt worden, dabei in Interaktion mit einem PLM System (Abramovici et al., 2011) und bei diversen Publikationen (Dienst et al., 2010), (Ansari et al., 2011), (Abramovici et al., 2012) vorgestellt worden.

## 4 Industriegüter

Zur Veranschaulichung der Funktionen und Ergebnisse des FAS wird ein Beispielprodukt ausgewählt, zu dem beispielhaft Daten generiert und analysiert werden. Auch sind die Ergebnisse anhand eines zusätzlichen komplexen Produkts evaluiert worden, von dem reale Daten aus der Praxis vorlagen. Durch die hohe Differenz zwischen den Produkten kann das FAS keine Ergebnisse hervorbringen, die uneingeschränkt für alle Produktklassen gelten oder auf diese sofort anwendbar sind. Daher ist es als Limitation des FAS erforderlich, sich auf bestimmte Produktklassen zu beschränken.

Generell erfolgt eine Klassifizierung der Produktklassen nach dem Kaufzweck, wobei unterschieden wird zwischen **Konsum-, Industrie- und Öffentliche Güter** (Winkelmann, 2008), (Michel & Oberholzer Michel, 2011). Konsumgüter werden für den persönlichen Verbrauch gekauft und die Käufer sind auch die Endnutzer des Produkts (Michel & Oberholzer Michel, 2011). Industriegüter dagegen werden von Käufern oder Organisationen für die Herstellung weiterer Produkte oder Dienstleistungen eingesetzt (Michel & Oberholzer Michel, 2011). Öffentliche Güter sind die, die von Bund, Ländern oder Kommunen produziert und vertrieben werden, wie Straßen (Daum et al., 2010). Da bei Konsumgütern hauptsächlich subjektives Feedback in Form von Kundenmeinungen zu erwarten ist (Schulte, 2007), sind für diese Arbeit die Industriegüter als Lieferanten von objektiven Feedbacks die relevante Produktklasse. Industriegüter werden in drei Hauptkategorien eingeteilt, wobei hier keine Dienstleistungen betrachtet werden (Kotler et al., 2011), (Daum et al., 2010):

- *Rohstoffgüter* (wie Rohstoffe, Vorprodukte, Baugruppen und Teile)
- *Produktionsgüter* (Grundstücke und Gebäude, Maschinen und Produktionsausrüstungen)
- *Energiegüter* (Versorgung mit Gas, Wasser oder Strom)

Wie die Aufzählung zeigt, handelt es sich um ein sehr breitgefächertes Gebiet (vgl. (Schweiger, 2009), (Michel & Oberholzer Michel, 2011)). Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der zweiten Kategorie, auf Produktionsgütern.

*Produktionsgüter* werden für einen bestimmten Zweck angeschafft und verbraucht, mit einer langfristig geplanten Nutzungsdauer (*über 8 Jahre*) (Mescheder & Sallach, 2012). Durch die Nutzungsdauer bedingt, gibt es einen *intensiven Kontakt zum Kunden* im Vergleich zu Konsumgütern, was ein Vorteil für die Erfassung der Feedbackdaten ist. So ist auch für den Kunden von Interesse Wissen auszutauschen, um so ein verbessertes Folgeprodukt zu erhalten (Mescheder & Sallach, 2012). Ein *Produktgeschäft zw. Hersteller und Kunden* ist zudem über den gesamten Nutzungszeitraum gegeben, wie durch die Anschaffung von Ersatzteilen und Komponenten für die Maschine (Backhaus & Voeth, 2009). Hierzu kann auch die Dienstleistung der Instandhaltungsmaßnahmen zählen. Die Anforderungen an die Güter sind auch unterschiedlich. So handelt es sich bei den Konsumgütern um Massenprodukte, die den Anforderungen aller entsprechen müssen, wohingegen Anlagegüter auch auf individuelle Anforderungen abgestimmt werden. Bei den Produktgütern für das

---

FAS handelt es sich um Maschinen, die wiederum genutzt werden, um Produkte oder eine Leistung herzustellen. Sie werden industriell betrieben.

Durch die hohe Differenz zwischen den Industrie Gütern, kann das FAS keine Ergebnisse hervorbringen, die uneingeschränkt für alle Produktklassen gelten oder auf diese sofort anwendbar sind. Eine Adaption auf andere Produktklassen ist möglich, aber stets mit Aufwand verbunden. Daher werden im folgenden Abschnitt Anforderungen an Produktklassen aufgestellt, die diese erfüllen müssen, um geeignet für das FAS zu sein.

#### 4.1 Anforderungen an Produktklassen für das FAS

Die Genauigkeit der Ergebnisse wissensbasierter Methoden steigt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Daten, da diese die Grundlage zur Generierung von Wissen mittels maschinellen Lernens bilden. Eine ausreichende Datenmenge zur Sicherstellung verlässlicher Ergebnisse kann gewährleistet werden, indem entweder ausreichend viele Produktinstanzen im Einsatz sind, oder die Nutzungsintensität der Instanzen sehr hoch ist (**BP\_1**).

**Tabelle 3: Anforderungen an das Beispielprodukt**

Anf.-Nr.	Anforderung	Erläuterung
BP_1	Datenmenge	Ausreichend hohe Datenmenge zur Analyse.
BP_2	Sensoren	Das Produkt muss über Sensoren verfügen.
BP_3	Service Daten	Service Maßnahmen werden während der Laufzeit des Produkts durchgeführt.
BP_4	Rückführung	Hersteller-Kunden-Beziehung, zur Rückführung der Daten aus der Produktnutzungsphase in die Entwicklungsphase.
BP_5	Hohe Laufzeiten	Die Laufzeit der Produkte muss hoch sein.
BP_6	Folgeprodukte	Keine Spezialanfertigung/-entwicklung von jedes Produktes, sondern Verbesserungen bzw. Entwicklung von Folgegenerationen.
BP_7	Übertragbarkeit	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Produktklassen.
BP_8	Vergleichbarkeit	Das Produkt muss kontinuierlich bei konstanten Betriebsbedingungen arbeiten.
BP_9	Hohe Stückzahl	Die Produkte (Maschinen/ Komponenten) müssen in einer hohen Stückzahl zu einer Generation laufen, um so eine ausreichende Datenmenge zu gewährleisten

Das Produkt muss über eingebettete Sensoren verfügen, um strukturierte Feedbackdaten liefern zu können (**BP\_2**). Auch wenn die Preise für Sensoren dank neuer Technologien in den letzten Jahren rückläufig sind, ist das Ausstatten von Produkten mit eingebetteten Sensoren eine kostspielige Angelegenheit, da nicht nur die Sensoren finanziert, sondern Aufnahmen, Halterungen etc. vorgesehen werden müssen, was einen zusätzlichen Konstruktions- und Fertigungsaufwand bedeutet. Zudem muss eine IT-Infrastruktur geschaffen werden, um die Daten zu erfassen. Dieser Aufwand lohnt sich nur für Produkte, bei

denen sich solch zusätzliche Investitionen nur gering bemerkbar machen (Anlagekosten hoch im Vergleich zu Kosten des Sensoreinbaus) und die dementsprechend eine lange Amortisationsdauer aufweisen (**BP\_5**). Weiterhin können die Feedbackdaten aus Wartungen generiert werden, wie den Intervallen, in denen diese durchgeführt werden. Daher müssen während der Laufzeit des Produktes Servicemaßnahmen durchgeführt und diese strukturiert erfasst werden (**BP\_3**).

Beziehungen zwischen Kunde und Hersteller werden in Geschäftsmodellen beschrieben, wobei je nach Ausprägung des Geschäftsmodells die Schwerpunkte der Erbringungsleistung beim Hersteller oder Kunden liegen. Eine intensive Hersteller-Kunden-Beziehung besteht nur, wenn die Erbringungsleistung und Verantwortlichkeit des Herstellers über die Lieferung einer Sachleistung hinausgeht. Dies ist erforderlich, damit die Daten aus der Produktnutzung in die Produktentwicklung zurückgeführt werden können (**BP\_4**).

Die Ergebnisse des Assistenzsystems werden zudem dazu eingesetzt, um die nächste Produktgeneration zu verbessern. Auch lohnt sich der zuvor beschriebene Aufwand eher, wenn Verbesserungs- oder Folgekonstruktion geplant sind, als wenn weitere Produktgenerationen folgen. Dann können erkannte Verbesserungspotentiale voll ausgenutzt werden (**BP\_6**). Die gewonnenen Erkenntnisse sollen nach Möglichkeit auf andere Produktklassen übertragen werden können, sodass die gefundenen Alternativen zur Verbesserung nicht nur auf eine Produktgeneration angewandt werden können, sondern auch auf weitere (**BP\_7**). Das Produkt muss kontinuierlich bei konstanten Betriebsbedingungen arbeiten und gewährleistet so eine direkte Vergleichbarkeit der gewonnenen Messdaten (**BP\_8**). Zudem muss eine ausreichende Anzahl an Instanzen / Komponenten in Betrieb sein, wovon dann die Daten erfasst werden (**BP\_7**).

## **4.2 Ausgewählte Produkte**

### **4.2.1 Hydraulische Strömungsmaschinen**

Hydraulische Strömungsmaschinen (Pumpen) erfüllen die oben aufgeführten Anforderungen und haben einen ähnlichen Aufbau. Auch zur Veranschaulichung sind sie gut geeignet, da ihr Aufbau nicht zu komplex und damit leicht nachvollziehbar ist.

#### **4.2.1.1 Funktionsweise und Klassifizierung von hydraulischen Strömungsmaschinen**

Hydraulische Strömungsmaschinen werden zur Druck- oder Geschwindigkeitserhöhung von Fluiden eingesetzt. Maschinen, die Gase als Fluid verwenden, werden als Verdichter bezeichnet. Der Aufbau einer Pumpe besteht im Allgemeinen aus einer Kammer und zwei Anschlüssen. Über die Anschlüsse gelangt das Fluid in die Kammer, in welcher die Energieübertragung stattfindet. Bei einer Pumpe befinden sich ein Anschluss auf der Zulaufseite (Saugseite) und der andere Anschluss auf der Ablaufseite (Druckseite). Die Erhöhung der Strömungsenergie dient im wesentlichen den folgenden Zwecken:

- Transport des Fluids in offenen Anlagen, wie z.B. Rohrleitungen zur Versorgung mit Wasser oder Öl
- Transport des Fluids in geschlossenen Anlagen, z.B. Umwälzung in Heizungsanlagen



- Förderung des Fluids aus tiefer liegenden Schichten zur Gewinnung des Fluids
- Energieübertragung auf das Fluid zu Antriebszwecken, wie z.B. hydrostatische Antriebe
- Energieübertragung zur Steuerung und Regelung von Stellmotoren

Die häufigste Klassifizierung von Pumpen erfolgt nach dem Funktionsprinzip bzw. Fördererelement:

1. **Verdrängerpumpen:** Bei Verdrängerpumpen wird durch Unterdruck das Fluid durch die Saugseite in einen geschlossenen Raum transportiert und anschließend durch die Rotation des Pumpenelements an der Druckseite abgegeben (Gülich, 2010). Bei vielen Verdrängerpumpen verhindert ein Ventil (z.B. Rückschlagventil) das Ausfließen/Ausströmen des Mediums über die Saugseite. Verdrängerpumpen werden unterschieden in oszillierende und rotierende Pumpen. Je nach Bauart ist der entstehende Strom pulsierend (z.B. Kolbenpumpen, Membranpumpen, etc.) oder konstant (z.B. Zahnradpumpen, Flügelpumpen, etc.). Verdrängerpumpen eignen sich zum Ansaugen von Medien und zum Erzeugen hoher Drücke. Der Wirkungsgrad ist jedoch im Vergleich zu Strömungspumpen gering.
2. **Strömungspumpen oder Kreiselpumpen:** Bei Strömungsmaschinen findet die Energieübertragung mit Hilfe von Schaufelrädern oder Schaufelgittern statt (Gülich, 2010). Sie beschleunigen das Fluid durch Zentrifugalkräfte und die Umlenkung an der Gehäusewand ohne Klappen oder Ventile. Im Stillstand kann das Fluid die Pumpe durch die Ansaugseite durchströmen. Beim Start der Pumpe muss die Kammer mit dem Fluid gefüllt sein. Strömungspumpen sind nicht selbst-ansaugend und sind daher nur bedingt als Saugpumpe geeignet.

Unterklassifizierungen bei Kreiselpumpen werden über die Form der Schaufelräder (auch Schaufelgitter) und damit über den Winkel der Saugseite der Pumpe zur Antriebswelle getroffen.

1. **Radialpumpen** sind Pumpen, bei denen die Saugseite radial zur Pumpenwelle steht (Wesche, 2012). Sie werden in der Regel bei eher niedrigen Drehzahlen betrieben (etwa  $7 - 30 \text{ s}^{-1}$ ) und verfügen über ein breites Anwendungsspektrum. Der Strom wird auf Grund der Geometrie stark umgelenkt.
2. **Diagonalpumpen** zeichnen sich durch eine schräg stehende Saugseite aus. Es findet also eine leichte Richtungsänderung des Fluid statt.
3. **Axialpumpen oder Propellerpumpen** sind in der Regel schnell laufende Pumpen (etwa  $160 - 400 \text{ s}^{-1}$ ). Anwendung finden sie in der Förderung von Gefahrstoffen und sensiblen Fluiden, da hier keine Umleitung stattfindet. Der Antrieb kann z.B. über eine Magnetkupplung erfolgen, sodass der Antrieb keinen mechanischen Kontakt zur Pumpenwelle hat und so ein Kontakt mit dem Fluid ausgeschlossen ist. In älteren Modellen wird die Pumpenwelle in ein winkelförmiges Rohr eingebaut, wobei die Antriebswelle aus der Rohrkrümmung herausragt. Das Fluid verlässt das Rohr axial zum Propeller.

Radialkreiselpumpen sind derzeit im Anlagenbau und in ähnlichen Bereichen die meistverwendete Pumpenart. Die Radialkreiselpumpen stellen somit ein konkretes und passendes Fallbeispiel dar (Abramovici et al., 2011). Die Variation der Radialkreiselpumpe

---

beschränkt sich auf die Baugröße. Pumpen werden häufig in Baugruppen gegliedert, wobei die Funktionsweise und der Aufbau gleich bleiben. Trotz des hohen Verbreitungsgrades wird wenig Aufwand betrieben, um den Wirkungsgrad der Pumpen zu steigern, welcher derzeit bei ca. 80% liegt. Es sind jedoch Wirkungsgrade von über 95% möglich. Das stetig zunehmende Umweltbewusstsein führt hier fortlaufend zu einem Umdenken, so dass die Effizienzsteigerung der Pumpen eine kommende Aufgabe für die Konstruktion ist. Anders verhält es sich im Bereich der Antriebe. Diese wurden stetig weiterentwickelt und erreichen bereits jetzt Wirkungsgrade von  $> 95\%$ , so dass Verbesserungen hier nur sehr eingeschränkt möglich sind.

#### 4.2.1.2 Feedbackdaten der Radialkreiselpumpe

Eine Pumpeneinheit besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Antrieb und der eigentlichen Pumpe. Der Antrieb oder Motor wird über genormte Schnittstellen angeflanscht. Am häufigsten werden zum Antrieb von Pumpen Elektromotoren eingesetzt, jedoch besteht auch die Möglichkeit, anders arbeitende Motoren einzusetzen (z.B. Ottomotoren, Druckluftmotoren). Der Antriebsflansch ist die Verbindung zwischen Antrieb und Pumpenwelle. Auf der Pumpenwelle sitzt das Schaufelrad, das auch Pumpenrad oder Schaufelgitter genannt wird. Bei der abgebildeten Radialpumpe (Abbildung 15) sitzt die Saugseite durch den Saugrohrflansch axial befestigt zur Achse der Pumpenwelle. Von hier wird das Fluid durch Löcher im Schaufelgitter geleitet. Die eigentliche Kraftübertragung erfolgt über die senkrecht von der Drehachse abstehenden, gebogenen Schaufeln. Am Gehäuse der Pumpe wird das Fluid umgelenkt und verlässt die Pumpe auf der Druckseite. Bei einigen Gehäusen verbreitert sich das Gehäuse außen und bietet dem Fluid so einen größeren Strömungskanal (Spiralgehäuse).

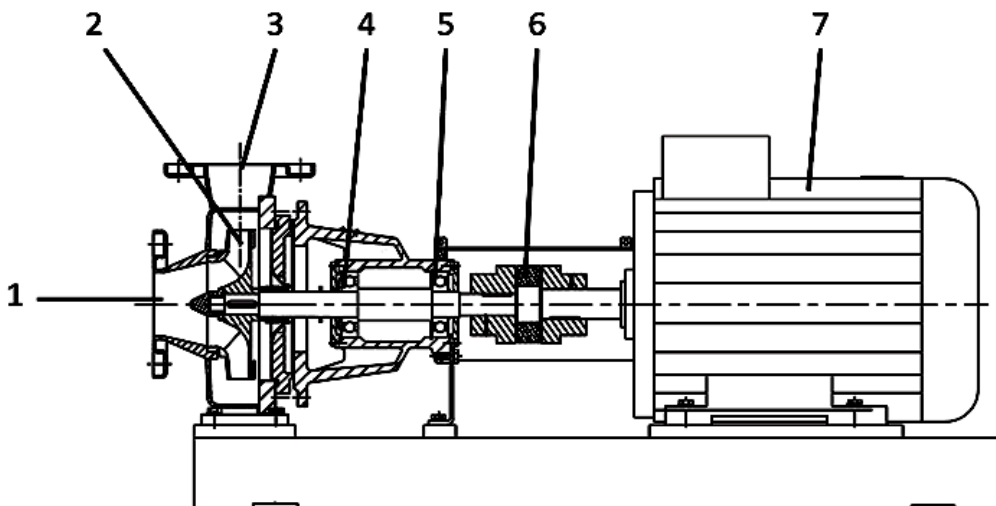


Abbildung 15: Sensoren einer Radialkreiselpumpe (Grundfos, 2010)

An Pumpen werden neben Sensordaten auch Servicedaten erfasst, insbesondere, wenn die Pumpen in kritischen Umgebungen betrieben werden. Daraus ergeben sich konkret die folgenden Daten, die von einer Radialkreiselpumpe erfasst werden, wobei die Nummern der obigen Abbildung zuzuordnen sind:

**Tabelle 4: Sensordaten einer Radialkreiselpumpe (Abramovici et al., 2011)**

Nr.	Komponente	Sensor
1	Eingangsseite	Druck
		Temperatur
2	Rotor	Umdrehungen
3	Ausgangsseite	Druck
4	Lager 1	Temperatur
		Schwingungen
5	Lager 2	Temperatur
		Schwingungen
6	Kupplung	Axialer Versatz
7	Elektrischer Antrieb	Umdrehungen

Service­daten sind ganz allgemein Daten, die beim Service anfallen. „Objektive“ Service­daten sind hier eine Untermenge der Service­daten, die quantifizierbar sind und sich somit anhand von Werten in Verbindung mit Maßeinheiten (wie Minute, Stück, Meter etc.) beschreiben lassen. Service­daten, die für die vorliegende Arbeit eine Rolle spielen, sind zum Beispiel Arbeitszeiten, Produktbetriebsdaten, verwendete Materialien, Ausfallzeiten, Störungs- und Ausfallursachen sowie Fehlerdaten des Ausfalls. In der folgenden Tabelle sind die Service­daten gelistet, die strukturiert erfasst werden. Dabei ist anzumerken, dass diese Daten unabhängig von dem betrachteten Beispielprodukt sind und daher generell erfasst und verwaltet werden können.

**Tabelle 5: Service­daten (Abramovici et al., 2011)**

<b>Seriennummer der Maschine (Identifikation)</b>
Maßnahme geplant/ ungeplant
Art der Maßnahme (Instandhaltung, Wartung,...)
Ausfallzeitpunkt
Ausfallursache
ID des Servicepersonals
Zeit zum Reparieren
Arbeitskosten des Servicepersonals
Austausch von Komponenten und die dazugehörigen Kosten

Die gewonnenen Messdaten dienen der Überwachung der kritischen Komponenten. Die Schwachstellen einer jeden Pumpe liegen wie bei jedem Produkt dort, wo Reibung entsteht oder Schnittstellen bestehen.

Bei einer Pumpe sind dies konkret:

- Lager
- Dichtungsringe
- Schmiermittel
- Rotor
- Kunststoffe und Plastik (Alterung; durch beförderte Medien angegriffen)

Besondere Gefährdung bildet beim Betrieb von Pumpen das Phänomen der Kavitation. Kavitation tritt auf, wenn der Verdampfungsdruck des Mediums in der Anlage unterschritten wird. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick darüber, welche Messdaten auf welche Fehler oder Verschleiß hinweisen können.

**Tabelle 6: Verbindung von Sensordaten und Fehlerursachen (nach Klaus Union GmbH)**

Überwachung  Messdaten	Dichtung Eingang	Dichtung Ausgang	Lager 1	Lager 2	Rotordefekt	Defekt Kupplung	Axialverschiebung des Rotors	Ablagerungen im Gehäuse	Schmierkanal verstopft
Druck Eingangsseite	●	●							
Temperatur Eingangsseite									
Druck Ausgangsseite		●			●		●	●	
Temperatur Ausgangsseite					●		●	●	●
Drehzahl Rotor			●	●	●	●	●	●	
Temperatur Lager 1			●						●
Schwingung Lager 1			●						
Temperatur Lager 2				●					●
Schwingung Lager 2				●					
Axialer Versatz							●	●	
Drehzahl Antrieb					●		●	●	

Mit den gewonnenen Informationen ist es nun möglich, die Messdaten mit den einzelnen Bauteilen bzw. Komponenten in Verbindung zu setzen, um den Zustand der Bauteile zu ermitteln. Sobald ein Messwert den Grenzwert über- oder unterschreitet, muss davon ausgegangen werden, dass ein Bauteil defekt ist.

#### 4.2.2 Blockheizkraftwerk

Weiterhin wird ein Blockheizkraftwerk (BHKW) als Datenlieferant herangezogen. Hier standen die Daten im Rahmen eines Praxisprojektes mit einer Klinik zur Verfügung. Bei einem BHKW kann ebenso wie bei einer Pumpe Verbesserungspotential für die nächste Produktgeneration abgeleitet werden, da auch dieses den Anforderungen an ein Beispielprodukt entspricht. Bei einem BHKW werden die erforderlichen Feedbackdaten erfasst und zurückgeführt. Auch wird das BHKW nicht als Spezialfertigung hergestellt. Aufgrund der Umweltfreundlichkeit der Lösung ist zudem davon auszugehen, dass zukünftig die Zahl der verkauften Anlagen weiter steigt und somit auch die Zahl der Feedbackdaten. Über das Jahr hinweg ändert sich zwar die Betriebsdauer, diese hängt allerdings von den Jahreszeiten ab und ist damit planbar.

Ein BHKW erzeugt gleichzeitig Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)).

*„Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage.“ (Schaumann & Schmitz, 2010).*

Durch die KWK nutzt man auch die Abwärme der Stromerzeugung, um Häuser zu heizen, Schwimmbäder zu erwärmen oder der Industrie Dampf zur Verfügung zu stellen (Pehnt, 2010). Im Prinzip kann man jedes Kraftwerk in ein „Heiz-Kraftwerk“ wandeln (Pehnt, 2010), (Schaumann & Schmitz, 2010). In Deutschland werden rund 12% der Brutto-Stromerzeugung mit KWK gedeckt (Pehnt, 2010). Ein BHKW kann so einen Gesamtwirkungsgrad von über 90% erreichen.

Bislang wurden BHKW vorzugsweise in großen Gebäudekomplexen, in Krankenhäusern, Wohnsiedlungen und Schwimmbädern eingesetzt. Mittlerweile werden sogenannte Mikro-Blockheizkraftwerke für Ein- und Zweifamilienhäuser angeboten, die ohne weiteres in jedem Technikraum untergebracht werden können (Wosnitza & Hilgers, 2012). Nicht benötigter Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und vom Stromversorgungsunternehmen vergütet (Viessmann Werke GmbH & Co. KG, 2012).

##### 4.2.2.1 Funktionsweise eines Blockheizkraftwerks

Die Funktionsweise des BHKW wird anhand des folgenden Beispiels erklärt:

*„In einer Brennkammer wird Brennstoff mit Luft verbrannt. Das Abgas hat immer noch eine Temperatur von 500°C. Über einen Wärmetauscher wird Wasser erhitzt und verdampft. Dieser Dampf wird in einer nachgeschalteten Dampfturbine ebenfalls in Strom umgewandelt. Danach hat das Abgas immer noch eine Temperatur von 180°C. Über einen zweiten Wärmetauscher wird es weiter abgekühlt. Diese thermische Energie wird an einen Wasserkreislauf übertragen und über gut gedämmte Fernwärmeleitungen an Haushalte oder die Industrie geliefert. Nicht nur die Abwärme des Abgases wird genutzt. Auch die Restwärme der Dampfturbine erwärmt den Fernwärmekreislauf.“ (Pehnt, 2010).*

Gängige fossile Brennstoffe in BHKW sind Diesel, Heizöl oder Gas, aber auch regenerative Energieträger, wie Biogas, Biodiesel, Rapsöl und neuerdings auch Holzpellets können ein-

---

gesetzt werden (Wosnitza & Hilgers, 2012). Eine Mikro- BHKW-Anlage beinhaltet im Wesentlichen die folgenden Komponenten (Wosnitza & Hilgers, 2012):

- Verbrennungsmotor als Antriebsaggregat
- Generator zur Stromerzeugung sowie
- Wärmeüberträger zur Wärmeauskopplung.

#### 4.2.2.2 Feedbackdaten des BHKW für den Erdgasbetrieb

Das betrachtete BHKW bestehen aus einer Motor-Generator-Einheit, die Strom erzeugt und mit Erdgas betrieben wird. An ihn gekoppelt sind Wärmetauscher. Auf der Wärmeseite wird das BHKW parallel zu einem Heizkessel betrieben (Viessmann Werke GmbH & Co. KG, 2012). Beide Wärmeerzeuger sind an die Heizungsanlage zur Erwärmung von Heiz- und Trinkwasser angeschlossen (Viessmann Werke GmbH & Co. KG, 2012). Integrierte Mikroprozessoren steuern den bedarfsgerechten Betrieb, wobei immer gleichzeitig Wärme und Strom anfallen. Aufgrund der beiden Funktionalitäten, die ein BHK unterstützt, handelt es sich um eine relativ komplexe Maschine mit diversen Baugruppen und Komponenten. Die Hauptbaugruppen der Einheit sind Motor, Generator, Kupplung, Gehäuserahmen, Wärmeübertragungssystem, Abgasreinigungssystem, Schmierölversorgungssystem, Schalldämmhaube, Ablüfter und Stromzähler, die wiederum aus diversen Komponenten bzw. Baugruppen bestehen.

**Tabelle 7: Feedbackdaten des BHKW**

Sensordaten (täglich)	Betriebsdaten (h/Monat)
Betriebsstunden	Erdgasverbrauch
Starts (Summe)	Wärmemengenzähler
Leistung (elektrisch)	Stromzähler
Lambdasonden Spannung	Betriebsstunden
Öldruck	Motorstarts
Abgastemperatur	
Kühlwassertemperatur	
Heizwassertemperatur vor Modul	
Heizwassertemperatur nach Modul	

Das BHKW steht zwar in der Klinik, die Instandhaltungsmaßnahmen werden allerdings von dem Maschinenhersteller übernommen (Stichwort *hybride Leistungsbündel*). Hierzu ist ein CM - System im Einsatz, dass die Sensordaten täglich erfasst, lokal speichert und an den Hersteller übermittelt, so dass der Hersteller anhand der Daten feststellen kann, ob ein Fehler vorliegt und was die wahrscheinlichste Ursache ist. Nun kann entschieden werden, ob ein Servicemitarbeiter geschickt werden muss, oder aber der Kunde einfache Maßnahmen selbst durchführen kann. Über die durchgeführten Servicemaßnahmen wird ein Protokoll geführt, beispielsweise welche Ersatzteile ausgetauscht wurden oder wie lang die Maßnahme gedauert hat. Zusätzlich werden monatlich Betriebsdaten aufgenommen. Hierbei handelt es sich u.a. um Input (Erdgasverbrauch) und Output (Strom, Wärme) Daten. Die Servicedaten sind dieselben wie in Tabelle 5 bei den Pumpen.

## 5 Feedbackdatenübertragung und Verwaltung

Die Feedbackdaten liegen in verschiedenen Datenbanken bei Kunden oder Serviceanbietern vor und müssen nun in die zentrale Datenbank des FAS übertragen werden. Hier werden die Feedbackdaten auf Basis eines DWH verwaltet. Es hat sich gezeigt, dass das DWH für die Verwaltung der Produktdaten aus verschiedenen Datenquellen nutzbar ist (Meier, 2009). In einem DWH werden nach *Gluchowski* die Daten aus internen und externen Datenquellen zusammengefügt und verdichtet in einer Datenbasis abgelegt, um sie dann als entscheidungsrelevante Inhalte dem Entscheidungsträger (Produktentwickler) zur Verfügung zu stellen (Gluchowski et al., 2008).

DWH wird zu dem Oberbegriff Business Intelligence (BI) zugeordnet. Unter BI wird allgemein ein *integrierter, unternehmensspezifischer informationssystembasierter Ansatz verstanden zur Unterstützung des Managements* (Kemper et al., 2006), (Gluchowski et al., 2008), (Burmester, 2011). Was unter BI genau zu verstehen ist variiert, je nachdem aus welcher Sicht wie Management oder IT der Begriff betrachtet wird. Das Ziel ist aber immer gleich, es sollen aus vorhandenen Daten Informationen für den Anwender nutzbar gemacht werden. Bei der IT-Sicht auf BI, die hier im Vordergrund steht, handelt es sich um *Tools und Anwendungen (wie Analysemethoden und Algorithmen) die auf die Datenbasis angewandt werden zur Auswertung und Repräsentation von Informationen* (Gluchowski et al., 2008). Hierzu können verschiedene Informationssysteme, wie ein DWH eingesetzt werden, die entscheidungsunterstützenden Charakter haben (Burmester, 2011).

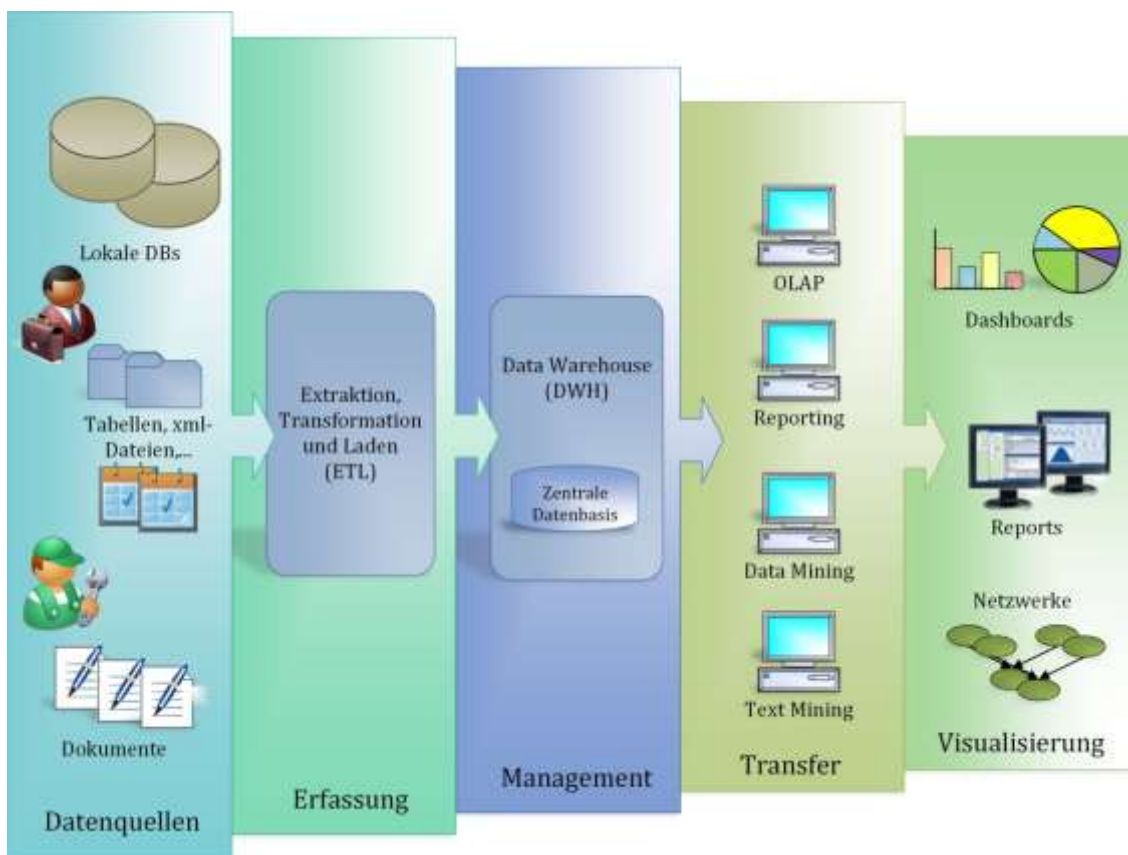
Unterschiede bei den Definitionen für ein DWH finden sich vor allem im generellen Zweck sowie im Umfang der Daten darin (Komplexität) und dem Umgang mit diesen (Schmidt-Volkmar, 2008). Die Vielseitigkeit beginnt mit der restriktiven Sicht von Inmon (Inmon, 2002), ein DWH sei eine themenorientierte, integrierte, chronologisierte und persistente Sammlung von Daten, um Managern und Mitarbeitern aller Ebenen bei Entscheidungsprozessen zu unterstützen. Die Definition von (Bauer & Günzel, 2013) ist auf einen speziellen Zweck, die Analysefunktion, ausgerichtet. Sie sehen das DWH als eine physische Datenbank, die eine integrierte Sicht auf (beliebige) Daten darstellt, um Analysen zu ermöglichen. Das Spektrum der Definitionen wird erweitert durch die Definition von (Zeh, 2003), in der ein DWH einen physischen Datenbestand darstellt, der eine integrierte Sicht auf die zugrunde liegenden Datenquellen ermöglicht, sowie (Kimball & Ross, 2002), nach der operationale Systeme der Ort seien, wo die Daten eingefügt würden, die im DWH wieder extrahiert werden. Die Realisierung eines DWH ist ein langjähriger kontinuierlicher Prozess, der auch als Data Warehousing bezeichnet wird (Inmon, 2002). Folgende Aspekte sind bei den Definitionen einheitlich (Inmon, 2002), (Schmidt-Volkmar, 2008), (Farkisch, 2011):

- **Themenorientiert:** Ein DWH ermöglicht eine globale Sicht auf heterogene und verteilte Datenbestände. Die für die globale Sicht relevanten Daten werden aus den Datenquellen zu einem gemeinsamen konsistenten Datenbestand zusammen geführt.
- **Integration:** Die Daten des DWH stammen aus unterschiedlichsten Quellen, z.B. aus Anwendungen und lokalen Datenbanken der Kunden. Vor der Übernahme der Daten in das DWH müssen diese in Bezug auf Name, Kodierung (z.B. unterschiedliche Dateiformate) und weiterer Merkmale vereinheitlicht werden. Ziel ist ein konsistenter und in-

tegrierter Datenbestand mit Fokus auf Aktualität und im fortlaufenden Abgleich mit den Originaldaten, auf dessen Basis verlässliche Auswertungen gemacht werden können, wie z.B. mit den Methoden des Data Mining.

- **Beständigkeit:** Die Daten im DWH werden über große Zeiträume gespeichert und somit vorgehalten. Dies führt zu hohen Ansprüchen an die Datenbanken in Bezug auf Datenzugriffe, Speichertechniken und Umfang des zu speichernden Datenmaterials.
- **Zeitorientierung:** Die Zeit muss als bewertbare Bezugsgröße enthalten sein. Im Gegensatz zu den operativen Daten, die zeitpunktbezogen sind, zielen DWH-Daten auf eine Zeiträumbetrachtung ab.

Die Architektur eines DWH ist in fünf Ebenen bzw. Schichten eingeteilt (Goeken, 2006):



**Abbildung 16: 5- Schichten Architektur**

Der Prozess der **Extraktion** und **Transformation** mit anschließendem **Laden** der Daten in das *Data Warehouse* wird als „*ETL-Prozess*“ der Datenerfassungsschicht bezeichnet (Behme & Mucksch, 2001; Gluchowski et al., 2009). Diese endet damit, dass die Daten in eine DB geladen und dort gemanagt werden. Die DWH-Datenbasis bildet den eigentlichen Kern des DWH-Konzeptes und stellt das DWH i. e. S. dar (Chamoni & Gluchowski, 2006). Prinzipiell lässt sich ein Datenbestand mit entscheidungsrelevanten Inhalten überall dort nutzen, wo dispositive bzw. analyseorientierte Aufgaben in Organisationen zu lösen sind (Gluchowski et al., 2008). In verschiedenen Projekten zu Verwaltung von Produktdaten (Bauer & Günzel, 2013) bzw. CM-Daten (Meier, 2009) hat sich die Eignung des DWH in



diesem Kontext gezeigt. Innerhalb der Transferebene werden dann die Informationen durch verschiedene Methoden in Wissen transformiert:

- **OLAP** steht für *Online Analytical Processing*, eine Methode der analytischen Informationssysteme. OLAP umfasst die Durchführung komplexer, multidimensionaler Analysen auf einer großen Menge von Daten (Farkisch, 2011).
- **Reporting** sind Berichte, die anhand der Datenbasis des DWH einen aggregierten Überblick zu unterschiedlichen Zwecken (wie Controlling) gibt. Neben den Standard- und Abweichungsberichten gibt es oftmals einen dritten Berichtstypus, den sogenannten Bedarfsbericht (Mertens & Meier, 2009).
- **Data Mining** wird auf strukturiert vorliegende Daten wie in Datenbanken zur Ableitung von Wissen angewandt.
- **Text Mining** wird im Gegensatz zu Data Mining auf unstrukturiert vorliegende Daten wie Texte oder Dokumente angewandt. Aktuell ist ein Forschungstrend im Kontext des DWH, diese zu erweitern, um Text Mining Methoden und die erforderliche Verwaltung der unstrukturierten Daten zu ermöglichen (Reimann, 2009).
- **Dashboards** orientieren sich an der visuellen Wahrnehmung des Menschen. Mit ihnen können Informationen intuitiv verständlich und anschaulich am Desktop dargestellt werden (Visualisierungsform; z.B. Kennzahlen, Cockpits), wobei die verdichtete Repräsentation eine zentrale Rolle bei den Dashboards ist (Gluchowski et al., 2008).

## 5.1 Auswahl eines Open Source Data Warehouses

Aus Kostengründen wird ein DWH aus dem Open Source Bereich zur Umsetzung von FAS ausgewählt. Die führenden DWH Open Source Tools sind **Pentaho** (Pentaho Corporation, 2013), **Jaspersoft** (Jaspersoft Cooperation, 2013) und **SpagoBI** (Golfarelli, 2009), (Feinberg & Beyer, 2010), (Evelson & Hammond, 2010). Die drei Tools sind BI Suiten und bieten zudem einen modularen Aufbau, sodass es möglich ist, je nach Bedarf weitere Module zu integrieren. Bei den Recherchen ist auch das Tool JPalo als Open Source DWH Lösung genannt worden (Manhart, 2009), (Evelson & Hammond, 2010), es hat aber seinen Schwerpunkt auf der Verarbeitung von mit Excel erzeugten Dateien und ist von daher nicht in die Bewertung mit aufgenommen worden.

### 5.1.1 Anforderungen

Zur Auswahl werden Anforderungen nach dem späteren Erfüllungsgrad „muss“, „kann“, „soll“ und „nicht“ aufgelistet und bewertet. Die Anforderungen sind nach den Themenschwerpunkten (1) funktionale (2) anwendungsbezogene und (3) sicherheitsbasierte zusammengefasst. Durch die Anforderungen ergibt sich, welche Tools zur Realisierung der geeigneten DWH- Lösung für das FAS notwendig sind.

#### 5.1.1.1 Funktionale Anforderungen

Das FAS benötigt zur Erfüllung des Anwendungsfalls 1, Funktionen zur *Datenhaltung* und *Datenerfassung*. Es muss die Möglichkeit bestehen, eine Schnittstelle zu unterschiedlichen beim Kunden befindliche Datenquellen (z.B. ERP-Systemen, DB und auch Dokumenten (z.B. txt, csv, xml,...)) herzustellen, um die Daten in das FAS zu übertragen. Die Feedback-

---

daten müssen unverändert in das DWH übertragen werden (**DWH-1**), damit anhand dieser eine Analyse durchgeführt werden kann. Dies wird durch ein ETL-Tool (**DWH-2**) realisiert, daher muss die auszuwählende DWH-Technologie dies unterstützen.

**Tabelle 8: Funktionale Anforderungen**

Nr.	Anforderung	Erläuterung	Zuordnung
<b>DWH-1</b>	Reale Daten	Übertragung der original Feedbackdaten	Muss
<b>DWH-2</b>	ETL	Automatische Übertragung aus verschiedenen Datenquellen in eine zentrale Datenbasis	Muss
<b>DWH-3</b>	DB	Datenbank zur Verwaltung der Feedbackdaten	Muss
<b>DWH-4</b>	Persistenz	Dauerhafte Bereitstellung integrierter und abgeleiteter Daten (Persistenz, Beständigkeit) <ul style="list-style-type: none"> <li>• mind. 10 Jahre</li> <li>• solange es noch aktuelle Versionen von der Maschine, bzw. Komponente gibt</li> </ul>	Muss
<b>DWH-5</b>	Metamodelle	Erstellen und verwalten eines Metadatenmodells	Muss
<b>DWH-6</b>	Reporting	Reports zu den aktuellen Verhalten des Produkts in der Nutzung und Ablage <ul style="list-style-type: none"> <li>• Output Format: csv, xml, pdf</li> </ul>	Muss
<b>DWH-7</b>	Dashboard	Möglichkeit zur Erstellung eines Dashboards, zur Darstellung von statistischen Auswertungen	Muss
<b>DWH-8</b>	Data Mining	Möglichkeit der Durchführung einer Datenanalyse und anschließender Visualisierung	Muss
<b>DWH-9</b>	Text Mining	Analyse von unstrukturiert vorliegenden Daten, wie Protokolle, Dokumente, Emails	Kann
<b>DWH-10</b>	Ankopplung	Es soll möglich sein das Tool bei Bedarf an bestehende Softwarelösungen anzukoppeln	Soll
<b>DWH-11</b>	Administration	Verteilen, Archivieren und Löschen großer Datenmengen	Muss

Die Datenhaltung erfolgt innerhalb des DWH in einer DB (**DWH-3**). Hierzu ist ein Open Source Datenbank-Server zu nutzen, der die Menge der erwarteten Feedbackdaten bewältigen kann. Die Daten werden dann persistent (**DWH-4**) über einen längeren Zeitraum in einem DWH gespeichert. Bei der Produktentwicklung ist die Dokumentationspflicht des Unternehmens in der Richtlinie EG 85/374 folgendermaßen geregelt: „Um den Entlastungsbeweis bei möglichen Produkthaftungsfällen führen zu können, müssen der Konstruktionsstand und die dazugehörigen Änderungsvorgänge mindestens **10 Jahre** nach Inverkehrbringen des Erzeugnisses noch zurückverfolgt werden können.“ (Directive, 1985).

Innerhalb des DWH ist eine Klassifikation der Daten so in der DB mittels eines Datenmodells umzusetzen, dass die Daten für die Analyse geeignet bereitgestellt werden. Außerdem muss das DWH Tool auch Funktionen zur Aufstellung von Metamodellen (**DWH-5**)

zur Verfügung stellen, um z. B. Zugriffsrechte auf Daten festzulegen. Diese Datenbasis bildet dann auch die Grundlage zur Erstellung von Reports (**DWH-6**) für den Nutzer direkt am Bildschirm, wobei es verschiedene Möglichkeiten der Darstellung, wie Tabellen etc. zu diversen Objekten und Produkten gibt. Eine weitere Form der visuellen Darstellung erfolgt über Dashboards (**DWH-7**), wo die Daten verdichtet und in einer leicht zu überschauen- den Art (unterstützt durch Farbgebung wie Ampeln) dargestellt werden. Um eine Analyse durchzuführen muss es möglich sein, Data Mining-Tools (**DWH-8**) für strukturierte Daten und ggf. Text Mining Tools (**DWH-9**) für unstrukturierte Daten zu integrieren. Der Zugriff auf ein DWH erfolgt normalerweise über einen Browser, es soll zudem aber auch möglich sein, das System an andere bestehende System zu koppeln (**DWH-10**). Zum Verteilen, Archivieren und Löschen großer Datenmengen (meist nach Zeit), wie *Backup/ Recovery, Zugriffsrechte, Ressourcenverwaltung, Scheduling* muss das Tool über entsprechende Administrationsfunktionalitäten (**DWH-11**) verfügen.

### 5.1.1.2 Anwendungsbezogenen Anforderungen

Für die spätere Anwendung wird das FAS über einen Server auf einem Standard User PC (**DWH-12**) mit der üblichen Softwareausstattung (**DWH-13**) laufen. Dabei soll das DWH benutzerfreundlich im Umgang sein, wobei hier die Betrachtung aus zwei Perspektiven gilt, einmal die des Informatikers, der das DWH aufsetzt (**DWH-14**) und dann die des Produktentwicklers, der es bedient.

**Tabelle 9: Anwendungsbezogene Anforderungen an das DWH**

Nr.	Anforderung	Erläuterung	Zu- ordnung
<b>DWH-12</b>	Server	Das FAS muss serverbasiert umgesetzt werden, sodass es an andere Systeme angekoppelt und von beliebigem PC angewandt werden kann.	Muss
<b>DWH-13</b>	Software	Aktuelle Software die Standardmäßig genutzt wird (z.B. Windows)	Muss
<b>DWH-14</b>	Benutzer- freundlichkeit	Das FAS soll für die Nutzung des Produktent- wicklers ausgelegt sein.	Kann
<b>DWH-15</b>	Support	Kontakt zum Anbieter ( <i>Email, Telefon,...</i> )	Kann
<b>DWH-16</b>	Verfügbarkeit	Die Nutzbarkeit des Systems muss zu den Ar- beitszeiten der Produktentwickler gewährleis- tet sein.	Muss
<b>DWH-17</b>	Nachhaltig- keit	Daten können mehrfach zur Analyse verwen- det werden, z.B. für verschiedene Analysen	Kann
<b>DWH-18</b>	Zukunfts- sicherheit	Das System muss zukünftig auch weiter zur Verfügung stehen.	Muss

Mittels eines Supports, kann gewährleistet werden, dass der Produktentwickler Unter-  
stützung bei der Bedienung erhält, aber auch Änderungswünsche transferieren kann (**DWH-15**). Die Verfügbarkeit des Systems muss immer gegeben sein, wenn der Produkt-  
entwickler damit arbeiten will (**DWH-16**). So muss die Datenübertragung und -analyse im  
Hintergrund laufen und darf das Verhalten des Systems nicht beeinflussen. Bei Analysen

bzw. Reports ist es zudem erforderlich, dass diese nachhaltig dokumentiert (**DWH-17**) werden, sodass die Ergebnisse einerseits als Beweis zur Verfügung stehen und andererseits wiederverwendet werden können. Das Open-Source-DWH muss auch zukünftig (**DWH-18**) mit aktuellen Versionen und einer breiten Community zur Verfügung stehen.

### 5.1.1.3 Sicherheitsbasierte Anforderungen

Aufgrund des Know-How Schutzes von Herstellern, ergeben sich folgende sicherheitsbasierte Anforderungen (Bauer & Günzel, 2013), (Müller, 2011):

- eine *Verschlüsselung* zur sicheren Datenübertragung im Internet (**DWH-19**).
- *Benutzeridentifikation und Authentifizierung* (**DWH-20**), um eine gesicherte Identität der Benutzer zu gewährleisten, zur Auswahl der Berechtigungen und zur Verhinderung von unautorisiertem Zugriff.
- Abhängig von der verwendeten Systemumgebung können spezielle *Single-Sign-On* Werkzeugen (**DWH-21**) zur zentrale Authentifizierung. Damit kann auf eine erneute Authentifizierung z.B. bei den Analysewerkzeugen verzichtet werden.
- Durch *Auditing* (**DWH-22**) kann eine Überwachung aller Ereignisse in einem System, vornehmlich für Revisionszwecken erreicht werden.
- *Autorisierung* zur Verwaltung der Zugriffsrechte, d.h. der Definition, wer auf welche Daten zugreifen darf und die *Zugriffskontrolle* der Überprüfung dieser Berechtigung während der Laufzeit (**DWH-23**).

**Tabelle 10: Sicherheitsbasierte Anforderungen an das DWH**

Nr.	Anforderung	Erläuterung	Zuordnung
<b>DWH-19</b>	Verschlüsselung	Verschlüsselung der übertragenen Daten	Muss
<b>DWH-20</b>	Benutzeridentifikation	Benutzeridentifikation und Authentifizierung (Login und Passwort)	Muss
<b>DWH-21</b>	Single-Sign-On	Keine Mehrfachanmeldung erforderlich	Kann
<b>DWH-22</b>	Auditing	Überwachung der Aktivitäten der User	Kann
<b>DWH-23</b>	Autorisierung	Autorisierung und Zugriffskontrolle (Rollen, z.B. Lesen, Schreiben,...)	Muss

### 5.1.2 Gegenüberstellung der DWH-Systeme

Zur Bewertung der drei DWH-Systeme werden die aufgeführten Anforderungen gewichtet und geprüft, wie gut die Systeme diese jeweils erfüllen. Hierfür wird ein Punkteschema erstellt, sodass zum Schluss abgelesen werden kann, welche DWH-Technologie am besten abschneidet (Balzert, 2011). Die Anforderungen sind dazu nach den folgenden Kriterien bewertet worden:

- **Musskriterien (Muss)**: für das Produkt unabdingbare Leistungen, die in jedem Fall erfüllt werden müssen.
- **Sollkriterien (Soll)**: die Erfüllung dieser Kriterien wird angestrebt
- **Kannkriterien (Kann)**: die Erfüllung ist nicht unbedingt notwendig, sollten nur angestrebt werden, falls noch ausreichend Kapazitäten vorhanden sind.

**Tabelle 11: Gegenüberstellung der Open Source DWH Lösungen**

Nr.	Anforderung	Max	Pentaho	Jaspersoft	SpagoBI
<i>DWH-1</i>	Reale Daten	Muss	●	●	●
<i>DWH-2</i>	ETL	Muss	●	●	●
<i>DWH-3</i>	DB	Muss	●	●	●
<i>DWH-4</i>	Persistent	Muss	●	●	●
<i>DWH-5</i>	Metamodell	Muss	●	●	●
<i>DWH-6</i>	Reporting	Muss	●	●	●
<i>DWH-7</i>	Dashboard	Muss	●	○	●
<i>DWH-8</i>	Data Mining	Muss	●	○	●
<i>DWH-9</i>	Text Mining	Soll	○	○	○
<i>DWH-10</i>	Ankoppeln	Kann	●	●	●
<i>DWH-11</i>	Administration	Muss	●	●	●
<i>DWH-12</i>	Server	Soll	●	●	●
<i>DWH-13</i>	Software	Muss	●	●	●
<i>DWH-14</i>	Benutzer-freundlichkeit	Soll	◐	◐	◐
<i>DWH-15</i>	Support	Kann	◐	◐	◐
<i>DWH-16</i>	Verfügbarkeit	Muss	●	●	●
<i>DWH-17</i>	Nachhaltigkeit	Kann	◐	◐	◐
<i>DWH-18</i>	Zukunftssicherheit	Muss	●	●	◐
<i>DWH-19</i>	Verschlüsselung <sup>1</sup>	Muss	◐	◐	○
<i>DWH-20</i>	Benutzer-identifikation	Muss	●	●	●
<i>DWH-21</i>	Single-Sign-On	Kann	◐	◐	◐
<i>DWH-22</i>	Auditing	Kann	◐	◐	◐
<i>DWH-23</i>	Autorisierung	Muss	●	●	●
	<b>Erfüllungsgrad:</b>		88%	81%	86%

Diese Anforderungen werden nach Erfüllungsgrad der Systeme untersucht, wie folgt:

- voll erfüllt
- ◐ teilweise voll erfüllt
- ◑ teilweise erfüllt
- ◒ teilweise nicht erfüllt
- nicht erfüllt

<sup>1</sup> Bei Verschlüsselung handelt es sich um ein Muss Kriterium, das von allen Systemen teilweise bzw. nicht erfüllt wird. Es gibt aber die Möglichkeit eine Erweiterung zu implementieren, sodass dies nicht zum Ausschluss der Systeme führt.

Sowohl bei *Pentaho* als auch bei *JasperSoft* gibt es einmal eine Open Source Variante und eine kommerzielle Variante, *SpagoBI* dagegen ist bisher nur als Open Source auf dem Markt. Wie in der Tabelle 11 zu sehen ist, gibt es zahlreiche Überschneidungen bei den verschiedenen Open Source Tools. Bei *JasperSoft* hat sich gezeigt, dass gleich zwei wichtige Anforderungen, die nach Data Mining-Tool und Dashboards (*siehe rote Markierung in der Tabelle 11*) nicht erfüllt werden. Hier haben die anderen beiden DWH-Tools klare Vorteile, da diese Tools dort standardmäßig unterstützt werden. Daher scheidet *JasperSoft* als Open Source DWH zur Realisierung des FAS aus, da es im Verhältnis zu diesem Nachteil auch keine großen Vorteile gegenüber den anderen beiden Tools gibt.

Die *Pentaho* Lösung bietet eine Anzahl an eigenen Anwendungen zur Umsetzung des FAS. So hat *Pentaho* die Rechte an verschiedenen Open Source Tools gekauft, um so eine unabhängige und für die Zukunft stabile Version aufzubauen, wobei der Umfang zusätzlich durch Lösungen aus der Community erweitert wird. „Besonders positiv fallen *Pentaho Data Integration (Kettle)*<sup>2</sup> und *Pentaho Report Designer* ins Auge. *Kettle* ist mit Hilfe von Plugins erweiterbar und damit sehr flexibel im Hinblick auf neue oder sich ändernde BI-Anforderungen. Der *Report Designer* überzeugt durch das Zusammenspiel mit der BI-Plattform: Berichte werden im *Report Designer* generiert und können anschließend auf der BI-Plattform veröffentlicht werden.“ (Pentaho Corporation, 2013).

Auch das Data Mining Tool „WEKA“ gehört seit 2006 zu *Pentaho*. Durch das Plug-in des ETL-Tools ist es möglich, die Data Mining Komponente von WEKA direkt zu integrieren. Die Verbindung zu einer DB wie MySQL ist mittels des ETL Tool schnell und leicht umzusetzen. Der Integrationsprozess wird durch einen Workflow graphisch unterstützt, bei dem direkt bei den verschiedenen Komponenten (wie z.B. der Schnittstelle zu DBs) Funktionen bearbeitet und gespeichert werden können. Damit ist es möglich, Filterungsprozesse zu automatisieren und Ausreiser oder aber fehlerhafte Daten gar nicht erst in DWH einzuladen. Aufbauend auf diesen Daten können Reports oder Dashboards berechnet werden, wozu auch eigene Lösungen zur Verfügung stehen. *Pentaho* ist als ein Gesamtpaket konzipiert und mit einer großen Community verbunden, sodass ein Wiki zu der Community-Version zur Verfügung steht, wo bereits Erweiterungen eingetragen sind. Durch das Administrationstool lässt sich die Nutzerverwaltung einfach managen, das ist vor allen Dingen in Bezug auf die Sicherheitsanforderungen wichtig. *Pentaho* ist auch bei anderen Projekten als Open Source Alternative ausgewählt worden (Prevedello et al., 2010).

*SpagoBI* ist im Gegensatz zu den anderen Tools nur als Open Source Version erhältlich und verfügt über die Möglichkeit, eine Vielzahl von Tools aus dem Open Source Bereich zu integrieren. Dabei fällt aber auf, dass es im Gegensatz zu den anderen Lösungen kaum eigene Lösungen verwendet, sondern hauptsächlich mit den Open Source Lösungen anderer arbeitet. *SpagoBI* hat auf Grund dessen den größten Funktionsumfang. Es schneidet aber in Bezug auf Verbreitung und Zukunftssicherheit nicht ganz so gut ab wie die anderen beiden Tools. Auch der Punkt Dokumentation und Wiki zur Umsetzung von *SpagoBI* könnte kritisch werden, da es nur eine kleine Community gibt und nicht so viele Informationen zur Verfügung stehen wie bei *Pentaho*.

---

<sup>2</sup> ETL Tool von Pentaho. Ehemals Kettle, seit der Übernahme ungenannt in *Pentaho Data Integration* (kurz PDI).

Die Entscheidung muss daher zwischen *Pentaho* und *SpagoBI* fallen, da auch von dem Erfüllungsgrad der Anforderungen am besten abgeschnitten haben, mit 88% (*Pentaho*) und 86% (*SpagoBI*). Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass aufgrund des Funktionsumfangs, beide Lösungen geeignet wären zur Umsetzung von dem FAS, *Pentaho* aber hinsichtlich der Dokumentation zur Umsetzung und Erweiterbarkeit leichte Vorteile hat und daher ausgewählt wird.

### 5.1.3 Pentaho

Die 2004 gegründete Pentaho Corporation ist nach eigenen Angaben der weltweit führende Anbieter für Open Source BI Lösungen (Pentaho Corporation, 2013). Pentaho ist sowohl als kostenlose Community-Edition (CE) als auch als kostenpflichtige Enterprise-Edition (EE) erhältlich. Die gesamte Software wurde in der Programmiersprache Java geschrieben, ist somit plattformunabhängig und lässt sich dadurch leicht in bestehende Architekturen integrieren (Pentaho Corporation, 2013). Pentaho ist eine kollaborative BI-Lösung mit einer AJAX-basierten Oberfläche, die auch für End-User leicht zu bedienen ist (Held & Klose, 2007). Über die User-Konsole können alle Pentaho-User zentral auf die BI-Daten zugreifen und mit ihnen arbeiten. Die Pentaho BI-Suite umfasst vier Teilbereiche zur Auswertung von Geschäftsdaten und Optimierung von Geschäftsabläufen: Reporting, Analyse, Dashboards und Prozessmanagement.

Die BI-Suite von Pentaho ist modular aufgebaut, setzt auf offene Standards und hat die Rechte an den folgenden Open Source Modulen (Raibold, 2010), (Pentaho Corporation, 2013):

- ***Pentaho BI Platform***: Frontend der BI-Suite, für zeitlich gesteuerte Berichte, Administration der Benutzersicherheit, Integration mit Drittanwendungen
- ***Pentaho Data Integration*** (PDI – ehemals KETTLE): Bereinigung und Integration von Daten – ETL. PDI ist in der Lage, aus nahezu jeder Datenbank Informationen zu extrahieren und daraus die Datenbasis eines DWH aufzubauen.
- ***Pentaho Metadata Editor***: grafische Benutzeroberfläche zur Definition der Metadaten
- ***Pentaho Reporting Designer*** (PRD - ehemals JFreeReport): Datenzugriff und Erzeugung von Berichten in verschiedenen Formaten wie z.B. PDF, HTML, CSV, Excel oder einfachem Text.
- ***Pentaho Analysis Services*** (Mondrian): interaktives und schnelles Analysieren von Daten über drei Dimensionen (*OLAP*)
- ***Pentaho Dashboards***: schneller Überblick über Metriken und Key Performance Indicator (KPI)
- ***Pentaho Data Mining*** (WEKA): automatische Erkennung von Mustern und Indikatoren in Daten

Die Dokumentation erfolgt über frei verfügbare Dokumente und Wiki, aufgrund der Verbreitung gibt es zusätzlich Bücher (Bouman & Dongen, 2009), (Raibold, 2010), die die einzelnen Umsetzungsschritte darstellen. Pentaho verfügt über keine eigene DB- Server, es kann aber mit den gängigen DB-Lösungen betrieben werden, wobei standardmäßig MySQL verwendet wird (Bouman & Dongen, 2009).

## 5.2 Umsetzung

Allgemein wird für die Umsetzung der Feedbackdatenübertragung und Verwaltung auf die zuvor beschriebenen DWH-Technologien (ETL, DB) zurückgegriffen. Zur Versorgung des DWH mit aktuellen Feedbackdaten, welche anhand des Zeitstempels identifiziert werden, wird regelmäßig die Extraktion durchgeführt. Diese kann sowohl synchron als auch asynchron sein (Bauer & Günzel, 2013):

- Bei der **synchronen Extraktion** wird jede Änderung der PNI sofort an das DWH übertragen.
- Die **asynchrone Extraktion** kann periodisch, ereignisgesteuert oder anfragegesteuert erfolgen (Kimball & Ross, 2002). Hierbei ist zu beachten, dass der Zugriff auf die Quellsysteme nach der Nachverarbeitung und nach deren Sicherung (Gluchowski et al., 2008) durchgeführt werden kann. Es werden daher zur Wahrung der Konsistenz (der Quellsysteme) während der Extraktion nur minimale Transformationen vorgenommen (Behme & Mucksch, 2001).

Für die vorliegende Arbeit wird die asynchrone Extraktion umgesetzt, wobei einmal täglich aktuelle Daten in das FAS geladen werden (Abbildung 17).

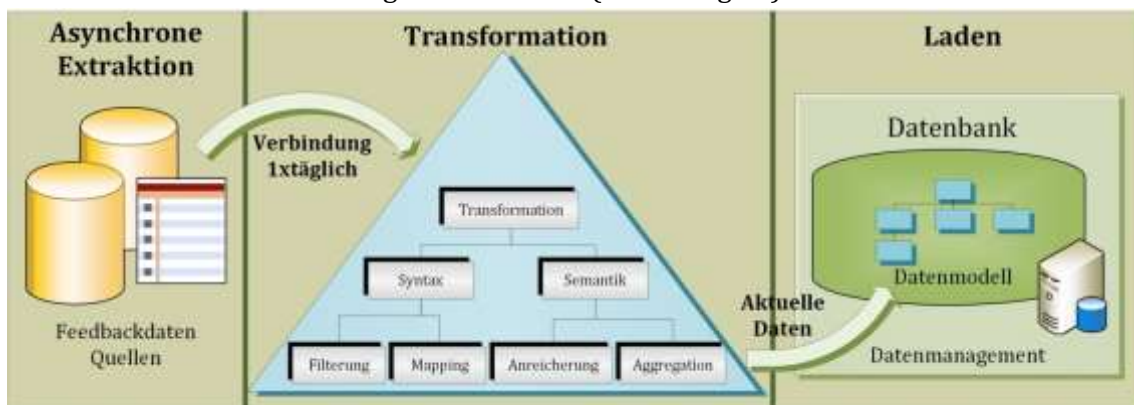


Abbildung 17: Übertragung der Feedbackdaten mittels ETL

Die aus den unterschiedlich strukturierten Quellen stammenden Feedbackdaten, denen unterschiedliche Wertebereiche wie Temperatur (Celsius, Kelvin,...) zugrunde liegen können, müssen dazu in ein einheitliches Datenschema transformiert werden (Bauer & Günzel, 2013). Die Daten sind dabei nicht frei von Defekten (Chamoni & Gluchowski, 2006), diese fehlerhaften Daten müssen gefiltert werden, sodass sie nicht in das DWH übertragen werden. Typische Transformationen und Transformationsschritte werden in zwei Bereiche eingeteilt (Bauer & Günzel, 2013):

- **Syntaktische Transformationen** - Hier geht es um die Verbesserung, Umsetzung oder Korrektur der Daten basierend auf formalen Aspekten. Die Daten werden gemäß der im Zielsystem notwendigen und angewandten Syntax modifiziert: einerseits durch eine Filterung, das heißt die Bereinigung der fehlerhaften Daten, andererseits durch das Mapping, das heißt, dass die Tabellen und Spalten der Quellen zu denen des Zielsystems und den dort verwendeten Datenformaten zugeordnet werden (Behme & Mucksch, 2001).



- **Semantische Transformationen** - Hierbei werden die Daten auf inhaltliche Aspekte überprüft und wenn nötig modifiziert und angereichert, um aussagefähige Informationen zu erhalten (Chamoni & Gluchowski, 2006). Hierunter fallen unter anderen die Eliminierung von Duplikaten (Objektidentifizierung) oder die Umrechnung von Maßeinheiten (z. B. von Kelvin nach Celsius). Des Weiteren werden die Daten auf den von den späteren Nutzern des DWH gewünschten Detaillierungsgrad – auch Granularität genannt – mittels einer Aggregation transformiert (Inmon, 2002).

Im Anschluss werden die transformierten Daten in die DB des FAS geladen.

### 5.2.1 Datenmanagement

Um eine Datenbasis des FAS zu realisieren, muss zuvor die Struktur der relevanten Daten in ein Datenmodell übertragen werden. Da das Datenmodell die Basis für die spätere Analyse ist, ist die Aufstellung eines geeigneten Datenmodells entscheidend für den erfolgreichen Einsatz des FAS. So müssen die Feedbackdaten zu einem Produkt zugeordnet abgelegt werden können, die Messwerte an sich variieren aber bei jedem Produkt. Dies umzusetzen ist eine große Herausforderung bei der Erstellung des Modells. Dieses wird mit Hilfe eines Datenbanksystems in eine **Datenbank (DB)** umgesetzt (Staud, 2005), (Jarosch, 2010). Hierzu wird die Open-Source-DB-Lösung MySQL genutzt. Ziel dabei ist es, ein allgemeingültiges Datenmodell zu entwerfen, dass für beliebige Maschinen gilt und nicht nur für die ausgewählten Beispielprodukte.

Das Datenmodell besteht, wie an den Farben in der Abbildung 18 zu sehen ist, aus fünf Hauptbestandteilen, den Produktstammdaten, den Instandhaltungs- und Messdaten, den Daten für die Entscheidungsunterstützung und den Ergebnissen (Dienst et al., 2011). Erzeugt worden ist das Modell mit *MySQL Workbench* (Oracle, 2011), um es dann anschließend in eine DB zu übertragen. Hierzu wird das Modell in die Structured Query Language (SQL) übertragen. SQL ist eine strukturierte Datenbanksprache zur Definition, Abfrage und Manipulation von Daten in relationalen Datenbanken (Cordts et al., 2011).

Im Zentrum (*blauer Kasten*) stehen die Stammdaten zu den Produkten, aufgeteilt in die Tabellen *Produkt* (Instanz) und *Generation*, wobei zu einer Generation  $1..n$  Instanzen zugeordnet werden können. Ein Produkt kann hierbei eine Maschine sein, die wieder aus anderen Maschinen bzw. Komponenten steht, daher besitzt die Tabelle eine Beziehung auf sich selbst. Zur eindeutigen Identifikation der Produkte wird die ProduktID genutzt. Diese wird aus dem PLM System aus der Produktentwicklung übertragen (Dienst et al., 2011), genau wie die anderen Stammdaten, wie Name, Inbetriebnahme usw., die dort erzeugt und verwaltet werden. Das hat den Vorteil, dass die Zuordnung aus der Produktentwicklung übernommen wird, die dem Produktentwickler somit bekannt ist.

Zu den Produkten werden Sensordaten, Instandhaltungsdaten und Betriebsdaten erfasst. Die Instandhaltungsdaten (*orange*) sind unabhängig von dem betrachteten Produkt. Hierbei werden, wie in Tabelle 5 aufgestellt die Zeiten und Kosten in der Tabelle *Instandhaltung* erfasst. Zugeordnet hierzu ist die Tabelle Servicemitarbeiter und Fehler, in denen die Fehlerdaten verwaltet werden.

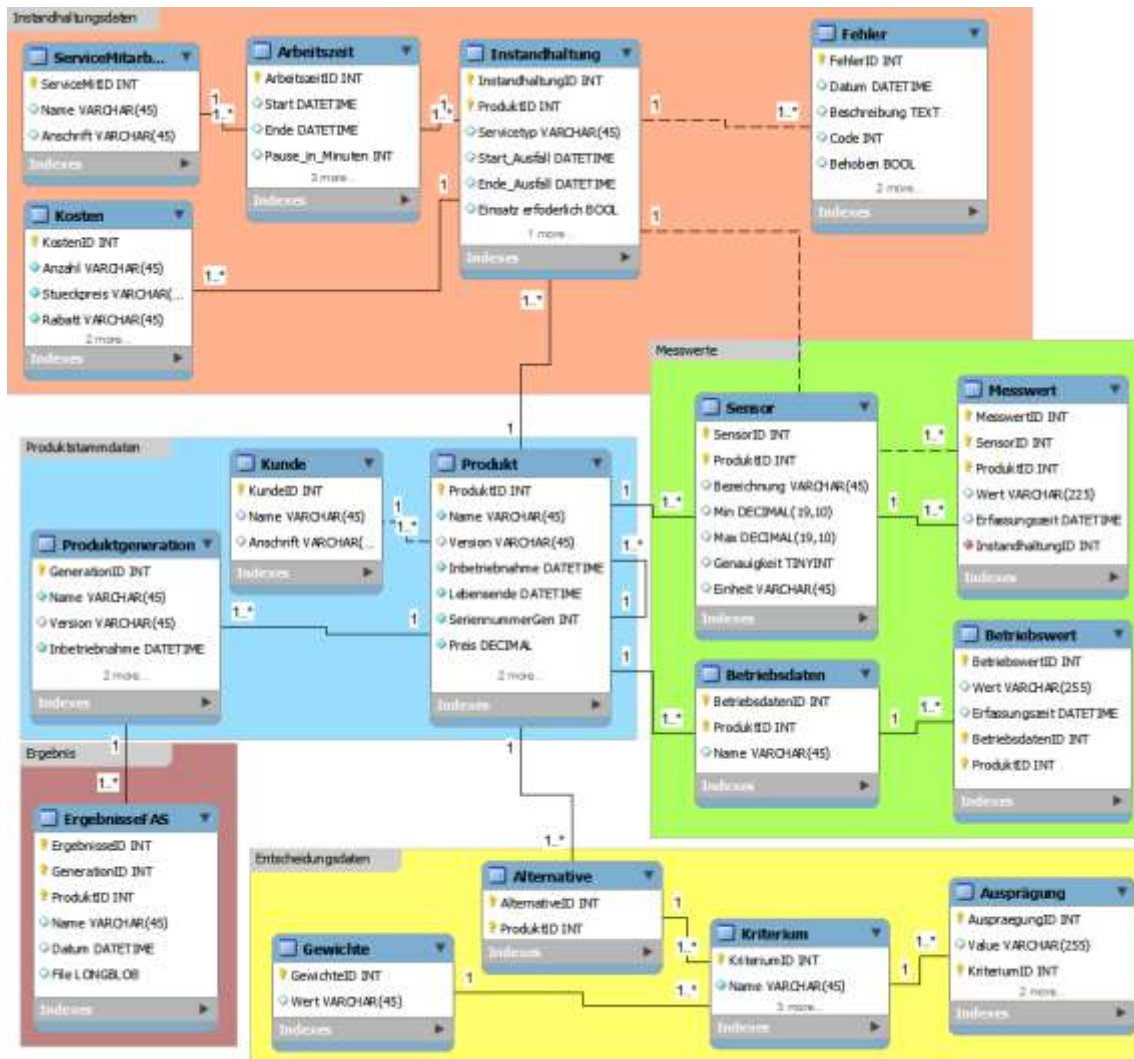


Abbildung 18: Datenmodell realisiert mit MySQL Workbench (Dienst et al., 2011)

Aus Gründen der Nachhaltigkeit sind die generierten Ergebnisse der wissensbasierten Methoden des FAS auch zu verwalten. Hierzu ist eine Tabelle *Ergebnisse* angelegt worden, wo Dateien in Formaten (wie pdf, xml) abgelegt werden können. Diese werden zusammen mit einem Zeitstempel abgelegt und zu der Produktgeneration zugeordnet.

### 5.2.2 Übertragung der Feedbackdaten in die DB

Aufgrund der Tatsache, dass zurzeit kein Partner aus der Praxis bei der Realisierung zur Verfügung steht, sind die Daten für das Beispielprodukt Pumpe simuliert worden. Die Daten werden durch das Pentaho-Data-Integration (PDI) Tool in die Zieldatenbank überführt. Bei PDI handelt es sich um das ETL-Werkzeug von Pentaho, welches zahlreiche Möglichkeiten zur Extraktion von Daten aus verschiedenen Quellsystemen zur Überführung in ein nahezu beliebiges Zielsystem bietet. PDI unterstützt dabei die gängigen DB-Lösungen wie Oracle oder MySQL, aber auch Dokumente wie Word, Excel oder PDF-Dateien, wobei der Zugriff über JDBC, ODBC oder JNDI möglich ist (Bouman & Dongen, 2009). PDI zeichnet sich vor allem durch seine Erweiterbarkeit durch Plug-ins aus. Die Anforderung der Extraktion der Daten aus Excel-Dateien sowie deren Aufbereitung mit anschließendem

Laden in eine MySQL-Datenbank leistet PDI bereits in der Standard-Version. PDI setzt sich aus vier Modulen zusammen (Bouman & Dongen, 2009):

- **Spoon** ist das graphische Tool zur Erstellung und Überprüfung von PDI Prozessen und zum Generieren von Transformationen und Jobs. Die Transformationen nehmen die Eingangsdaten und filtern die relevanten Daten, um die Ergebnisse in der DB zu speichern. Jobs werden bei PDI zur Koordination der Transformationen eingesetzt. Der Job ist gleichzusetzen mit der Extraktion, er ist für die Übertragung der Daten und der Auslösung der Transformation zuständig.

**Pan** wird genutzt für Batch-Verarbeitungen der Transformationen

**Kitchen** für die Verarbeitung der Job chains.

**Carte** startet den Remote-Server, der die Transformation remote mit Spoon ausführt.

### 5.3 Erfassung der Instandhaltungsdaten

Die Frage ist nun, wie die relevanten Feedbackdaten aus der Instandhaltung erfasst werden können. Bei den Sensordaten werden die Daten mittels CM Systemen automatisch in Datenbanken abgelegt, wohingegen die Erfassung der Instandhaltungsdaten aktuell nicht automatisiert erfolgt. Hierzu ist eine stichprobenartige Befragung von Servicemitarbeitern bei verschiedenen regionalen Unternehmen durchgeführt worden. Dabei wurde folgender Trend bzw. Zustand gemessen, anhand dessen Aussagen über den Ist-Zustand abgeleitet werden: Momentan werden von den Servicemitarbeitern Protokolle oder Berichte verfasst und die für die Abrechnung notwendigen Informationen (wie verbrauchte Ersatzteile, Arbeitszeit) werden in lokale DB bei Serviceanbietern oder Kunden übertragen. Die Dauer der Nachtragung erfordert durchschnittlich eine längere Zeit als die Erfassung der Daten. Aus der vergleichsweise kurzen Erfassungszeit und der aufwändigeren Nachtragszeit lässt sich schließen, dass die handschriftliche Erfassung der Daten eher formlos erfolgt. Entsprechend mehr Aufwand muss darauf folgend auf das Nachtragen verwendet werden. Auch wenn mobile Software in den meisten der an der Befragung beteiligten Firmen noch nicht Fuß gefasst hat, so kann doch eine Grundbereitschaft zur Nutzung einer solchen Software festgestellt werden.

Als Hilfsmittel gewinnen in zunehmendem Maße mobile Lösungen an Bedeutung (Cappemini, 2011). Durch diese kann die Instandhaltung effizienter gestaltet werden (ICS, 2013). Hierbei kommen PDAs (Schnek, 2010) oder Tablets zum Einsatz (ICS, 2013). Hierbei liegt der Fokus nicht auf der strukturierten Ablage von Daten in ERP Systemen, sondern der Organisation der Servicemitarbeiter bei der Vergabe von Aufträgen. So können diese direkt ihre Aufträge zugeschickt bekommen und annehmen und die notwendigen Informationen für den Auftrag erhalten. Hierbei ist es das Ziel, die Instandhaltung zu verbessern und die erfassten Daten zur Abrechnung zu nutzen. Eine weiterführende Analyse ist nicht Ziel der Lösung. Daher ist am Institut für Wissensbasierte System (WBS) eine mobile Lösung entworfen worden, mittels der medienumbruchsfrei direkt vor Ort die Feedbackdaten von dem Servicemitarbeiter erfasst und automatisch in DB übertragen werden können. Zusätzlich werden die Servicemitarbeiter im Außendienst durch die kontextbezogene Bereitstellung von Informationen unterstützt, beispielsweise das Vorliegen

neuer Aufträge oder Kundendaten basierend auf den zuvor beschriebenen Anforderungen an ein mobiles Instandhaltungstool. Hierbei wird im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Lösungen eine Software entwickelt, die auf einem Handy (z.B. HTC) lauffähig ist. Hierdurch benötigt der Mitarbeiter keine extra Hardware und kann zusätzlich die Kontaktdaten der Kunden zur Kommunikation (Telefon, Email,...) nutzen. Am Ende ist ein System entstanden, das es dank seiner offenen und ausbaufähigen Struktur ermöglicht, es für andere mobile Applikation aus dem Servicebereich zu erweitern (Schmidt, 2011). So können die Daten mit anderen Systemen synchronisiert werden, wie hier mit dem FAS.

### 5.3.1 Entwurf eines mobilen Instandhaltungstools

Der Realisierung des mobilen Instandhaltungstools zur Erfassung und zum Transfer von Instandhaltungsdaten ist eine Entwurfsphase vorgelagert, die Anforderungen aus Theorie und Praxis zusammenfasst. Im Vordergrund steht dabei immer der Grundgedanke, eine Software zu entwickeln, die auch als Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen im Bereich der mobilen Erfassung von Instandhaltungsdaten dienen kann.

#### 5.3.1.1 Anforderungen aus der Instandhaltung

Aus den allgemeinen Betrachtungen zum Service, inklusive der durchgeführten Befragung zum Ist-Stand der Instandhaltungsdatenerfassung in Unternehmen, ergeben sich folgenden Anforderungen für die zu entwickelnde mobile Softwarelösung.

**Tabelle 12: Anforderungen aus der Instandhaltung**

Nr.	Anforderung	Erläuterung
I-1	Arbeitszeiten	Die Erfassung von Arbeitszeiten muss möglich sein.
I-2	Kosten	Bei der Durchführung von Servicetätigkeiten entstehende Kosten (durch die Verwendung von Materialien, Produkten oder den Einsatz von Arbeitszeit) müssen erfasst werden.
I-3	Produktbetriebsdaten	Es müssen umgebungs- und produktbezogene Betriebsdaten erfasst werden können, wie z.B. die Umgebungstemperatur oder der Druck in einer Komponente.
I-4	Ausfallzeiten	Die Ausfallzeiten einer Betrachtungseinheit müssen erfasst werden können.
I-5	Ausfallursache	Die Ursache für einen Ausfall einer Betrachtungseinheit muss erfasst werden können.
I-6	Stücklisten	Einzelnen Produkten müssen Komponenten hierarchisch zugeordnet werden können.
I-7	Instanz bezogene Daten	Es muss möglich sein, Daten zu Produktinstanzen erfassen zu können.
I-8	Einsatzbezogene Daten	Alle zur Durchführung der jeweiligen Servicetätigkeit benötigten Daten müssen bei Bedarf angezeigt werden können.
I-9	Datenintegrität	Alle erfassten Daten müssen unverändert übertragen werden.
I-10	Ausfallschwere	Klassifizierung der Schwere des Ausfalls von kleinen Mängel bis hin zu Totalschaden
I-11	Auswirkungen	Bestimmung der Auswirkungen eines Ausfalls/ Fehler

### 5.3.1.2 Anforderungen aus dem Bereich Mobil Computing

Unter *Mobile Computing* versteht man allgemein die „Benutzung von vernetzten mobilen Endgeräten zum Abruf und zur Bearbeitung von Daten.“ (Bollmann & Zeppenfeld, 2010).

**Tabelle 13: Anforderungen aus dem Bereich *Mobile Computing* (Schmidt, 2011)**

Nr.	Anforderung	Erläuterung
II-1	Medienbruchfrei	Die gesamte Kommunikation muss auf elektronischem Wege erfolgen, um etwaige Störeinflüsse weitestgehend auszuschließen.
II-2	Netzanbindung	Das Endgerät muss eine gute Netzanbindung bieten. Voraussetzung dafür ist eine hohe Netzabdeckung mit möglichst großer Bandbreite.
II-3	Multifunktionelles Endgerät	Zur Akzeptanzsteigerung beim Anwender kann ein Endgerät verwendet werden, das auch andere benötigte Funktionen abbildet.
II-4	Bedienbarkeit	Die Bedienung der mobilen Anwendung muss einfach zu erlernen sein.
II-5	Skalierbarkeit	Die Softwarelösung muss skalierbar sein, d.h. sie muss auf einem beliebig erweiterbaren Pool von Endgeräten einsetzbar sein.
II-6	Transferierbarkeit	Die Softwarelösung muss transferierbar sein. Wenn ein Endgerät defekt ist, muss sich die Datenbasis ohne großen Aufwand auf ein anderes Endgerät transferieren lassen.
II-7	Informationsfülle	Die mobile Anwendung muss alle wichtigen Informationen für die Durchführung von Servicetätigkeiten anzeigen.

Mobile Endgeräte sind Geräte, die es einem Benutzer ermöglichen, „Dienste über ein drahtloses Netzwerk oder lokal verfügbare mobile Anwendungen zu nutzen.“ (Bollmann & Zeppenfeld, 2010). Die Bandbreite mobiler Geräte reicht von kleinsten Spezialgeräten bis hin zu Computern mit der Leistungsfähigkeit von stationären Rechnern.“ (Roth, 2005). Mobile Systeme bieten laut (Kropp & Dünnebacke, 2010) den Vorteil, dass sie schnelle Reaktions- und Bearbeitungszeiten ermöglichen. Sie haben vielfältige Potenziale, manuelle Tätigkeiten und somit auch komplexe Prozesse weitgehend zu automatisieren. Die Anforderungen aus dem Bereich *Mobile Computing* stellen die technischen und funktionellen Rahmenbedingungen für die Realisierung der mobilen Software dar. Gefundene Anforderungen, die nicht direkt für die Konzeptionierung dieser mobilen Software relevant sind, wie z.B. die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern, wurden hier nicht aufgeführt.

### 5.3.1.3 Entwicklungsumgebung

Für die Umsetzung der mobilen Software ist das Endgerät HTC HD2 als Geräteplattform verwendet worden. Das Gerät bietet einen kapazitiven Touchscreen und ermöglicht eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit durch einen großen Arbeitsspeicher, HSPA-Unterstützung und einen schnellen Prozessor. Dieses Gerät lässt sich als Smartphone kategorisieren, d.h., dass Außendienstler damit nicht nur die mobile Anwendung nutzen können, sondern z.B. auch telefonieren sowie E-Mails und SMS lesen bzw. schreiben können. Durch die Ver-

wendung des .NET Frameworks ist mobilen Software auch auf anderen Geräteplattformen, die das .NET Framework integrieren, lauffähig. Das ist möglich, da der Programmcode nicht direkt in eine hardwareabhängige Maschinsprache, sondern zunächst in einen Zwischencode übersetzt wird.

### 5.3.1.4 Datenfluss und Konzept

Um ein Datenschema für das Instandhaltungstool zu generieren, ist in der folgenden Abbildung der notwendige Datenfluss zwischen Kunden, Maschine, Serviceanbieter und -mitarbeiter dargestellt.

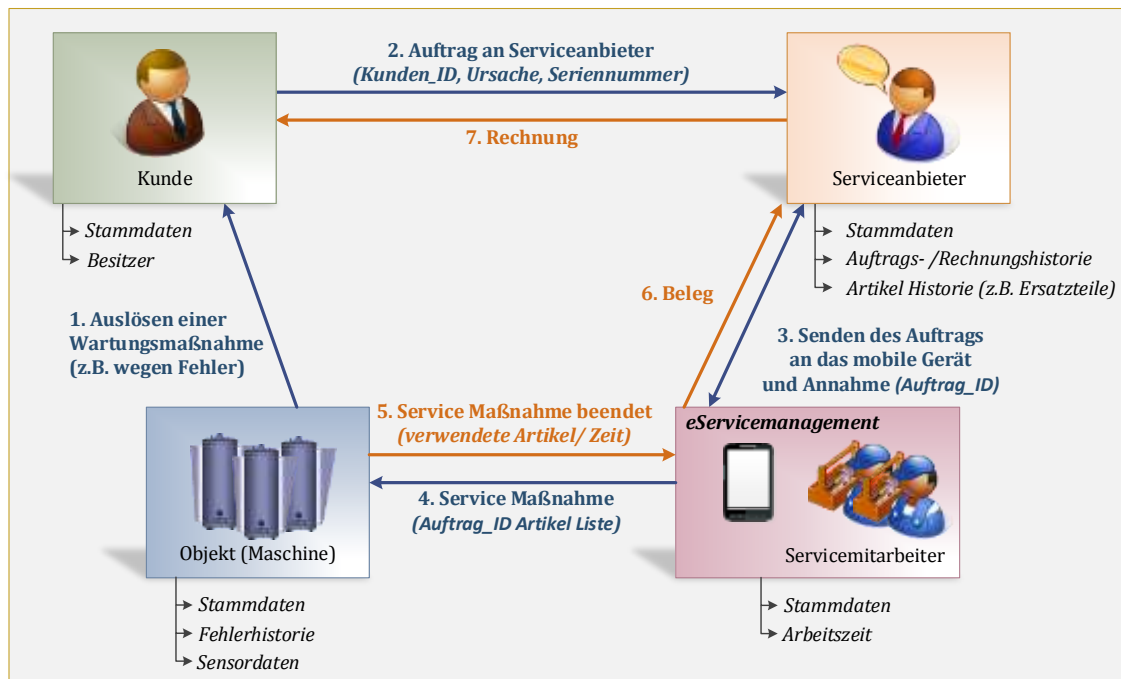


Abbildung 19: Datenfluss bei der Instandhaltung mit dem mobilen Gerät (Dienst et al., 2014)

Der Datenfluss wird ausgelöst durch das Objekt bzw. die Maschine (1.), z.B. wenn ein Fehler auftritt oder aber eine routinemäßige Instandhaltung ansteht. Auch kann die Instandhaltung durch CM ausgelöst werden. Dann kann der Besitzer der Maschine, in diesen Fall der Kunde (2.), einen Auftrag an den Serviceanbieter übermitteln. Dieser leitet den Auftrag an alle verfügbaren Servicemitarbeiter via der mobilen Softwarelösungen weiter (3.), einschließlich zusätzlicher Informationen wie Ursache und Adresse. Nun kann ein Servicemitarbeiter den Auftrag annehmen, sodass er für alle anderen gesperrt wird. Während der Durchführung der Maßnahme (4.) werden dann die Daten wie Arbeitsbeginn und -ende, eingesetzte Ersatzteile, usw. direkt erfasst und nach Abschluss der Maßnahme (5.) an die DB des Serviceanbieters übermittelt (6.). Dieser nutzt sie dann zur Abrechnung (7.) mit dem Kunden.

Aus dem Datenfluss lässt sich sodann der Entwurf von dem mobilen Instandhaltungsgerät durchführen, d.h. die Feedbackdaten, die in der Produktnutzungsphase anfallen, werden von den mobilen Endgeräten erfasst, via *WebService* in einer lokalen Datenbank gespeichert und später in die zentrale DB des FAS zu übertragen (Abbildung 20). Dabei liegt der Hauptfokus auf den Daten, die während bzw. zu dem Service erfasst werden. SOAP 1.2 ist

eine Komponente von *WebService* (Finger & Zeppenfeld, 2009) für eine xml-basierte Standard - Übermittlung von Daten oder Nachrichten. Die relevanten Daten für den Servicemitarbeiter werden von lokalen DB an das mobile Endgerät zum Auslösen und assistieren bei der Instandhaltung übertragen. Nach Abschluss der Maßnahmen werden dann die durchgeführten Maßnahmen, sowie die erfassten Zeiten, an die DB in Form eines Belegs übertragen. Dies sind dann auch die für das FAS interessanten Daten.

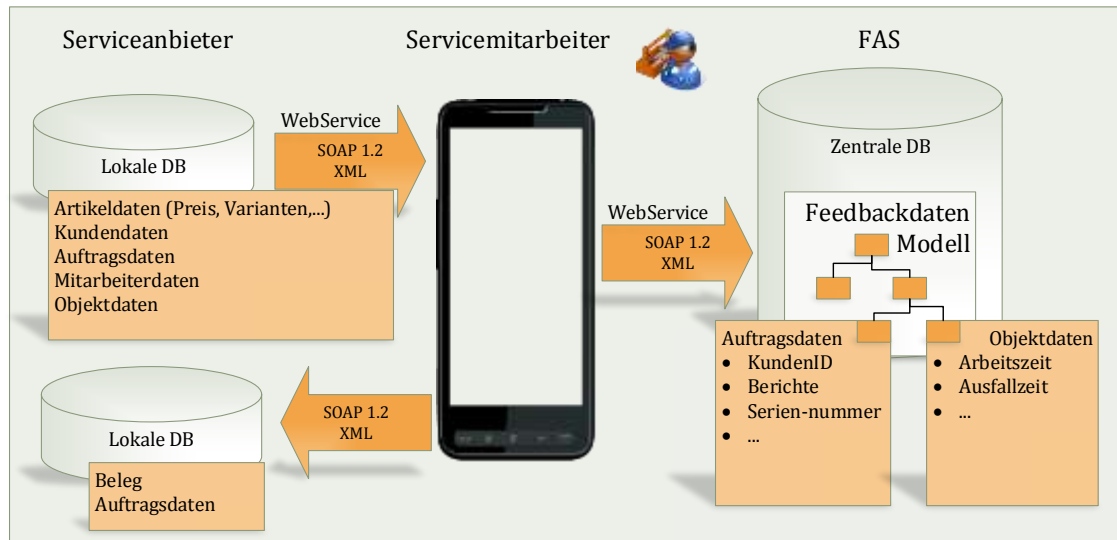


Abbildung 20: Konzept des mobilen Instandhaltungsgeräts (Dienst et al., 2014)

### 5.3.2 Implementation des Konzeptes

Basierend auf dem entwickelten Konzept wird nachfolgend eine prototypische Software implementiert. Die Umsetzung umfasst dabei nicht nur die prototypische Software, sondern auch einen *WebService*, der den Datenaustausch mit der Datenbank ermöglicht. Zunächst wird dazu das Datenbankschema umgesetzt. Weiterhin werden für die Synchronisation Trigger (Datenbankprozeduren, die nicht vom Benutzer, sondern vom System aufgrund des Eintretens von festgelegten Ereignissen ausgeführt werden) benötigt.

Zur Kommunikation zwischen mobiler Software und DB wird ein *WebService* erstellt. Für die Implementierung wird das sogenannte *Proxymuster* angewendet. Bei dem Entwurfsmuster *Proxy* handelt es sich nach (Gamma et al., 2011) um ein Strukturmuster, das den Zugriff auf ein Objekt mithilfe eines vorgelagerten Stellvertreterobjekts kontrolliert und ggf. auch reglementiert. Da die lokale Stellvertreterklasse hier den Zugriff auf ein Objekt aus einem anderen Adressraum ermöglicht, spricht man in diesem Fall auch von einem *Remote-Proxy*. Basierend auf den Anforderungen aus der Konzeptionierung wird für die mobile Software der zuvor dargestellte Datenfluss umgesetzt. In dem Konzept wird skizziert, welche Daten vom *WebService* aus dem ERP-System an das mobile Gerät übermittelt werden und welche auf dem Gerät erfassten Daten zurück in das ERP-System gesendet werden. Dabei ist zu beachten, dass immer bekannt ist, welches Endgerät mit dem *WebService* kommuniziert und somit, welcher Servicemitarbeiter die Daten abrufen oder sendet.

Der *WebService* benötigt zudem folgende Funktionsbereiche:

- Anmeldung von neuen Endgeräten

- Bereitstellen von Informationen darüber, ob und welche Daten sich geändert haben
- Bereitstellen von neuen Stammdaten pro angemeldetem Endgerät
- Bereitstellen von neuen Aufträgen pro Endgerät
- Speichern von Aufträgen und auftragsbezogenen Daten

Die *AppCore*-Klasse ist der zentrale Kern der Anwendung implementiert worden. Hier werden unter anderem Referenzen auf die Log-Klassen, die Datenbankverbindung, die Konfigurationsklasse und die Formularklasse bereitgestellt, diverse Stammdaten für den schnellen Zugriff im Speicher vorgehalten und vieles mehr. So erfolgt bspw. der Zugriff auf Anwendungsdialoge ausschließlich über die statische *AppCore*-Klasse (Schmidt, 2011). Als Alternative dazu hätten die *AppCore*-Klasse und ihre referenzierten Klassen auch nach Singleton-Entwurfsmuster implementiert werden können, was die Möglichkeit einer weiteren Instanziierung der Klassen ausgeschlossen hätte. Darauf wurde im Zuge der besseren Code-Lesbarkeit verzichtet.

Die Konfiguration des Programms wird mithilfe einer abstrakten Klasse realisiert. Diese abstrakte Klasse stellt die Grundfunktionalität zum Laden und Speichern von Feldern, die sich in der erbbenden Klasse befinden, im XML-Format bereit. Ermöglicht wird dies durch die Nutzung von *Reflection*-Mechanismen des Frameworks, die von der abstrakten Klasse verwendet werden, um Felder und deren Typen von Subklassen zu nummerieren. Dieses Vorgehen erlaubt das einfache Hinzufügen und Löschen von Konfigurationsparametern, die zur Entwurfszeit (inkl. automatischer Code-Vervollständigung) zur Verfügung stehen, und somit eine dynamische Konfiguration der Software.

Um auch offline arbeiten zu können ist für die mobile Software die Synchronisation von Stammdaten und erfassten Daten von besonderer Bedeutung, da ein Servicemitarbeiter auch in empfangsschwachen Gebieten, wie z.B. Kellerräumen oder abgelegenen Produktionsstätten, unbedingt Zugriff auf diese Daten haben muss. Dadurch kann die Funktion der Software unabhängig von der Netzwerk-Verbindung sichergestellt werden. Eine vollständige *SyncML*-Implementation ist für diese Arbeit allerdings nicht notwendig, da keine Stammdaten (wie Kundendaten, Artikeldaten, etc.) auf dem Endgerät verändert werden dürfen. Daher wurde ein eigener Synchronisierungsmechanismus auf Basis von *SyncML* implementiert. Der Vorteil daran ist, dass diese Art der Synchronisation mit wenig Aufwand bei jeder relationalen Datenbank verwendet werden kann. Es müssen also nicht erst Replikationskomponenten o. ä. auf Seite des Datenbankservers installiert werden.

### 5.3.3 Performance der Instandhaltungssoftware

Eine zentrale Funktion der Software ist die Bereitstellung von kontextbezogenen Informationen. Dazu werden Stammdaten wie Kundeninformationen, Artikelinformationen, produktinstanzbezogene Informationen, Serviceinformationen etc. angezeigt. Eine Besonderheit dieser Software ist die hohe Aktualität der Stammdaten durch einen Abgleich mit einer ERP-Datenbank. Die Performance des mobilen Endgerät beinhaltet die folgenden Funktionalitäten:

- **Benachrichtigungen:** Um den Servicemitarbeiter möglichst zeitnah über neue Aufträge zu informieren, kommuniziert die mobile Software im Hintergrund mittels dediziertem Thread mit dem *WebService*. Die Art der Kommunikation kann per Konfiguration



zwischen einer *Polling*- und einer *Push*-Methode umgestellt werden. Beide Methoden kontaktieren zyklisch den *WebService*, um die aktuelle Anzahl der für das jeweilige Endgerät bereitgestellten Aufträge in Erfahrung zu bringen, damit vorliegende Aufträge per Benachrichtigung angezeigt werden können. Im Gegensatz zu der *Polling*-Methode, die – ausgelöst durch ein frei wählbares, zeitliches Intervall – einen Aufruf an den *WebService* sendet, kontaktiert die *Push*-Methode den *WebService* erst wieder, wenn der alte Methodenaufruf einen Wert oder einen Timeout liefert.

- **Kosten von Service Aktivitäten:**
  - **Kosten von Artikeln:** diese werden mit Hilfe der mobilen Software durch die Erfassung von Positionen in einem Beleg (z.B. einem Serviceauftrag) erfasst. Unter einer Position versteht man ein Tupel aus einer Artikelreferenz, einer Menge, einem Einzelpreis und einem Rabatt. Aus diesen Elementen wird die Zwischensumme berechnet, die aufsummiert die Gesamtsumme eines Belegs und somit die anfallenden Kosten ergibt. Beispielhaft ist in Abbildung 21 eine graphische benutzer-Schnittstelle (GUI) für die ausgetauschten Ersatzteile dargestellt. Wobei es eine weitere Liste aller verfügbaren Ersatzteile gibt, die über den Button „+“ geöffnet werden kann.
  - **Arbeitskosten:** weitere Kosten können durch erfasste Arbeitszeiten entstehen. Dafür ist in der Datenbank die Möglichkeit gegeben, pro Mitarbeiter einen Arbeitszeitkosten-Artikel zu bestimmen.
- **Zeiten der Instandhaltung:**
  - **Arbeitszeiten** können minutengenau akquiriert werden, siehe Screenshot 2 in Abbildung 21. Dort können die Zeiten wie *Arbeitsbeginn* /-ende, aber auch *Pause* und *Anfahrt* erfasst werden. In dem oberen Bereich sind die Kundeninformationen abgebildet, die direkt bei einem Auftrag an die mobile Anwendung mit übermitteln werden. Zusätzlich dazu werden auch noch Kontaktinformationen wie Email oder Telefonnummer bereitgestellt, über diese Medien kann sodann direkt über das Tool kommuniziert werden. Wenn die Daten bestätigt werden, werden sie nach Beendigung der Instandhaltungsmaßnahme in eine DB transferiert und dort gemanagt.
  - **Fehlerzeiten:** die Zeiten zu Fehlern, vom Auslösen der Instandhaltungsmaßnahme bis zur Beendigung werden erfasst, um so Kennzahlen wie Mean Time Between Failures (MTBF) zu berechnen.
- **Objektive Instandhaltungsinformationen:** in Screenshot 3 in Abbildung 21 werden allgemein Informationen zur Instandhaltung erfasst, beschrieben von oben nach unten:
  - Zu Anfang kann die **Art des Services** (Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Verbesserung und Inbetriebnahme) ausgewählt werden, die der Servicemitarbeiter durchführt, so dass festgestellt werden kann, ob es sich um eine routinemäßige Instandhaltung handelt oder nicht.
  - **Identifizierung der Produktinstanz** einschließlich der Seriennummer, an der Maßnahmen durchgeführt werden, erfolgt, in dem durch Anklicken von Objekt ei-

ne Liste der verfügbaren Maschinen angezeigt wird. Dies ist erforderlich, um die erfassten Daten innerhalb des FAS einem Produkt zuordnen zu können.

- Es können sodann manuell die Messwerte zu den Maschinenkomponenten eingegeben werden.
- Der nächste Button betrifft die Erfassung der Fehlerzeiten wie zuvor beschrieben.
- Um den **Schweregrad des Fehlers** zu bestimmen, von unbedeutend bis hin zu Totalschaden, bedarf es der Erfahrung des Servicemitarbeiters. Des Weiteren ist hier die Priorität vermerkt, die dem Fehler bzw. der Maßnahme beigemessen wird und ggf., welche Folgeaktionen notwendig sind.

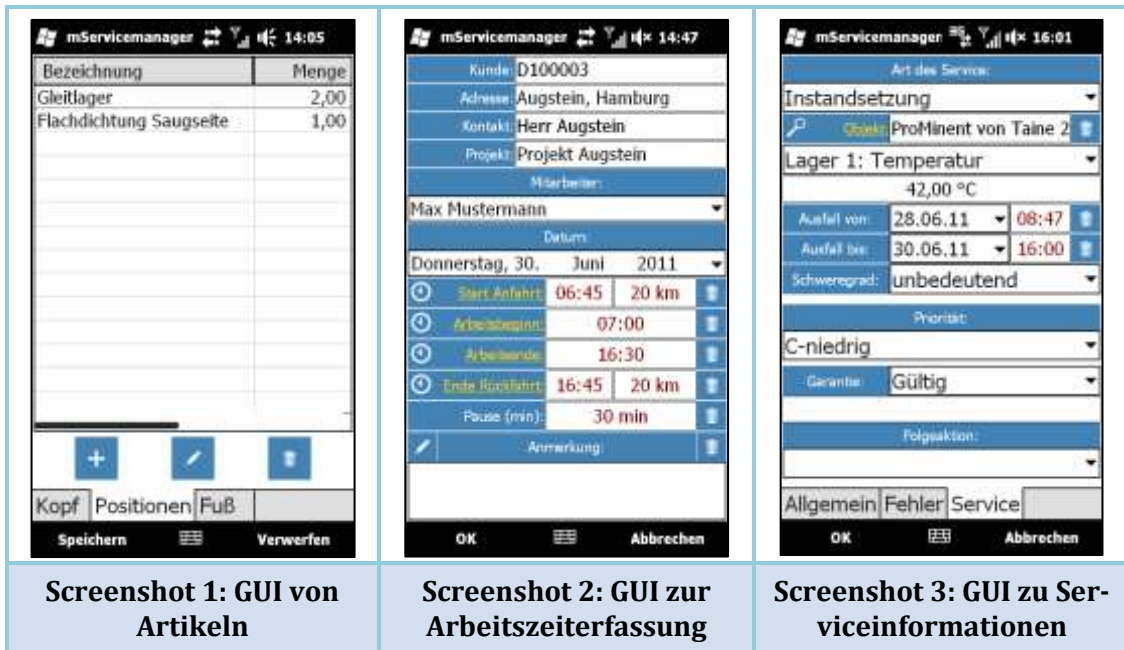


Abbildung 21: Screenshots von dem mobilen Endgerät (Schmidt, 2011)

- **Protokoll:** Es besteht auch hier die Möglichkeit, direkt über das Tool ein Protokoll zu verfassen, wo der Servicemitarbeiter zusätzlich zu den erfassten Informationen, die für eine Abrechnung ausreichen, Texte hinterlegen kann.
- **Fotos:** Weiterhin werden Fotos erfasst und direkt übermittelt. Eine Beispielanwendung stellt eine Garantieprüfung dar, bei der ein Bild eines gebrochenen Siegels sowohl den Sachverhalt klärt, als auch zur Beweissicherung aufgehoben werden kann.

Die gesamten Daten werden zum einen in ein DB - System bei dem Serviceanbieter übertragen, zum anderen werden sie in das FAS übertragen und dort als Feedback aus der Instandhaltung verwaltet. Die Daten werden immer dann übertragen, wenn eine Maßnahme vom Servicemitarbeiter beendet wurde.

Die erfassten Daten können zudem als Grundlage dienen, um Verbesserungspotential bei der Instandhaltung selbst abzuleiten. Hierbei stehen die Kostendaten im Vordergrund, die durch den Einsatz eines mathematischen Modells und Algorithmen optimiert werden sollen (Ansari et al., 2012), (Ansari et al., 2013).

## 6 Wissensbasierte Methodenkombination

In diesem Abschnitt werden die Kernfunktionen des FAS zum Wissenstransfer aus der Nutzung in die Entwicklung beschrieben. Hierzu wird eine wissensbasierte Methodenkombination in das FAS integriert für die Anwendungsfälle:

- „Auslösen der Produktentwicklung“ durch eine Evaluierung der Anforderungen mittels Kennzahlen,
- „Ermittlung der Fehlerursache“ durch die Erzeugung einer Wissensrepräsentationsmethode und
- zur „Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl einer Verbesserungsalternative“.

### 6.1 Auslösen der Produktverbesserung

Eine Produktverbesserung ist grundsätzlich erforderlich, wenn das Produkt die an es gestellten Anforderungen nicht länger erfüllt. Die Anforderungen müssen quantifizierbar und prüfbar sein (VDI\_2519, 2001). Quantifizierbare Anforderungen können partiell direkt gemessen oder als Kombination mehrerer Feedbackdaten bestimmt werden. So ist es das Ziel, mittels einer *statistischen Analyse* die aus den Feedbackdaten berechenbaren Kennzahlen visuell dem Produktentwickler direkt am Desktop zu repräsentieren, zur Umsetzung des Anwendungsfalls 2 „Analyse und Überprüfung von Anforderungen“. Mit dem Ziel bei Nichterfüllung der Anforderungen eine Produktverbesserung auszulösen, da das aktuell genutzte Produkt und dessen Entwicklungs-Lösung nicht verwendet werden kann.

Hierzu ist es nicht erforderlich, eine WRM umzusetzen, da es nur darum geht, Kennzahlen darzustellen, wozu Reports eingesetzt werden. Traditionell ist Reporting ein Mittel aus dem Bereich des Controlling, um zu überwachen, ob ein Unternehmen seine Ziele (wie Gewinn, Qualität) erreicht (Laier, 2011). Reports bzw. Berichte werden als Informationsquelle für das Management eingesetzt, wo in regelmäßigen Abständen Berichte zu Ereignissen oder Entwicklungen innerhalb und außerhalb des Unternehmens erstellt werden (Taschner, 2013). Diese Berichte werden verwendet, um die wesentlichen Ergebnisse, Analysen und ggf. Verbesserungsvorschläge zu kommunizieren (Sowa, 2011). Auf Grund der Tatsache, dass Reports für unterschiedliche Adressaten und Zielsetzungen entwickelt werden, gibt es unterschiedliche Formen von Reporting (Sowa, 2011). Die ITCPG-Studie identifizierte folgende, am häufigsten verwendete Formen (ITCPG, 2010), (Sowa, 2011):

- a) Business Impact Summary bzw. Management Summary Report,
- b) Exception Report,
- c) Risk Priority Reports (Report über Risikoprioritäten),
- d) Dashboard Report (mit verschiedenen Ansichtsmöglichkeiten),
- e) Emergency Email and phone notification systems (Alarmierungssysteme),
- f) Written Reports (schriftliche Reports).

Dashboard Reports eignen sie sich aufgrund der Möglichkeit zur interaktiven Nutzung am Desktop zur Darstellung von relevanten Informationen (Gluchowski et al., 2008) hervorragend im Kontext der FAS. Hierbei werden die selektierten Daten der Datenbasis fusio-

---

niert, um generelle Informationen für die betrachtete Aufgabenstellung visuell bereit zu stellen (Gluchowski et al., 2008), (Eckerson, 2011). Dabei werden die Darstellungen durch intuitiv verständliche Diagramme (siehe Abbildung 22) und passende Farbgebung (wie Ampelfarben) unterstützt.

	Struktur	Rangfolge	Zeitreihe	Häufigkeit	Vergleich
Kreis					
Balken					
Säulen					
Histogramm					
Punkt					

Abbildung 22: Diagrammtypen (Sowa, 2011)

Bei der Gestaltung von Reports müssen die folgenden vier Dimensionen berücksichtigt werden (Taschner, 2013):

- Inhalt (Was soll dargestellt werden?): Informationsarten/ -quellen etc.
- Format (Wie soll das Wissen dargestellt werden?): Darstellungstypen, technische Unterstützung usw.
- Zeit (Wann werden Berichte dargestellt, bzw. über welchen Zeitraum?): Aktualität, Intervalle...
- Organisation/ Personal (Wer erstellt den Report und für wen?)

Verbunden werden die vier Dimension über den späteren Einsatzzweck des Reports (Taschner, 2013). Der Zweck der *statistischen Analyse* ist die Auslösung der Produktverbesserung, wenn die aktuelle Generation die Anforderungen nicht erfüllt. Das wer ist hier der spätere User, der *Produktentwickler*, und der Entwickler der *Knowledge Ingenieur*, der den Report umsetzt. Dargestellt werden Kennzahlen, die aus den Feedbackdaten berech-

net werden, auf deren Darstellung Dashboards ausgelegt sind. Hierzu ist es notwendig zu bestimmen welche Kennzahlen auf Basis der Feedbackdaten berechnet werden können.

### 6.1.1 Aufstellen der Kennzahlen

Unter Kennzahlen (Werte, Measures, Indikatoren) versteht man allgemein die zu planenden bzw. zu berichtenden Größen wie Mengen (z. B. Stückzahlen und Arbeitsstunden), Beträge in Geldeinheiten (z. B. Erlös- und Kostenwerte, Deckungsbeiträge), aber auch Bestandsgrößen (Anlagenbuchwerte) und Prozentwerte (z. B. Rentabilitätskennzahlen) (Schön, 2012). Diese können die Entwicklung der Werte über einen Zeitraum von bspw. einem Jahr darstellen, aber auch die aggregierten Informationen z.B. zu den Gesamtkosten auf einen Blick.

Da die Kennzahlen aus den Feedbackdaten berechnet werden, gibt es verschiedene Dimensionen, die im Kontext der Produktverbesserung relevant sind. Es gibt die Sensordaten, die das Maschinenverhalten überwachen, die Instandhaltungsdaten, die Zeiten und Kosten betreffen, und die Betriebsdaten, die Verbrauch, Produktivität und Zeiten erfassen und Aussagen zur Qualität zu lassen. Die Kennzahlen werden zur Anwendung durch den Produktentwickler, zugeordnet zu einem Produkt, ausgewertet und dargestellt und den Kategorien Zeit und Kosten zugeordnet.

#### 6.1.1.1 Zeitbezogene Kennzahlen

Aus der Produktnutzungsphase gibt es bereits vordefinierte Kennzahlen, die auch für die Produktentwicklung von Interesse sind (vgl. hierzu u.a. (VDI\_3432, 2011)). Diese bestehen aus der gesamten *Bereitschaftsdauer* einer Maschine, die allgemein 24 h beträgt (vgl. Abbildung 23). Anhand der Betriebsdaten kann dann ermittelt werden, wie hoch die *Nutzungsdauer*  $T_{Nutz}$  der Maschine ist. Diese variiert und hängt jeweils von dem Kunden und dem dortigen Betrieb ab (z.B. Schichtanzahl).



Abbildung 23: Abgrenzung der Zeit-Kennzahlen zur Dauer nach (Wiendahl 2005)

Als weitere Basiskennzahlen zu Zeit gibt es die Summe aus der *Stillstandsfreien Lebensdauer* ( $\sum TBF$ ), d.h. die *Nutzungsdauer*  $T_{Nutz}$  subtrahiert um die *Stillstandzeiten* der Maschine, wie Pausen, die über die Instandhaltung oder Betriebsdaten erfasst werden. Sodann gibt es noch die Kennzahl *Störungsfreie Lebensdauer*. Hier werden die Stillstandzeiten für Fehler und Instandhaltung subtrahiert, von der *Nutzungsdauer*  $T_{Nutz}$ . Die aufsummierten Zeiten des Stillstands aufgrund von Fehlern bei einer Maschine stehen für die Instandhaltungszeiten  $\sum TTR$ .

Aus den Kennzahlen lassen sich zudem die folgenden Durchschnittskennzahlen berechnen (Wiendahl 2005), (Strunz, 2012), (Pawellek, 2013):

**Formel 1: Mittlere Laufdauer (Mean Time Between Failures):**  $MTBF = \frac{\sum TBF}{\text{Anzahl TBF}}$

**Formel 2: Mittlere Ausfalldauer (Mean Time To Repair):**  $MTTR = \frac{\sum TTR}{\text{Anzahl TTR}}$

**Formel 3: Technische Verfügbarkeit:**  $V = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$

**Formel 4: Technische Zuverlässigkeit:**  $Z = 1 - \gamma t = 1 - \frac{T_t}{MTBF}$ ,

mit  $\gamma = \frac{1}{MTBF}$  und  $t = T_t$ ;  $\gamma$ : Ausfallrate und  $T_t$ : Taktzeit

Die MTTR kann noch unterteilt werden in die Zeit die es nach dem Fehler/ Ausfall der Maschine dauert bis die Reparatur gestartet wird („Mean Time To Repair Start – MTTRS“) und die reine Dauer der Reparatur („Mean Repair Time – MRT“).

### 6.1.1.2 Kostenbezogene Kennzahlen

Um auf dem Markt konkurrenzfähig zu bleiben, ist es notwendig, die Kosten so effizient wie möglich zu gestalten. Unter dem Aspekt einer kosteneffizienten Produktentwicklung interessieren vor allem die durch Produkte verursachten Kosten (Ehrlenspiel et al., 2007). Bisher werden primär die Herstellungskosten (wie Material) betrachtet. Meist wird erst zum Ende der Produktentwicklung festgestellt, ob die Kostenziele erreicht wurden oder nicht. Eine Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung hat jedoch ergeben, dass die Betrachtung der Lebenszykluskosten zukünftig stark an Bedeutung gewinnen wird (Ehrlenspiel, 2007), (Noske & Kalogerakis, 2009). Diese sind auch unter dem Namen *Lebenszykluskosten (LCC)* bekannt (Schweiger, 2009). Dabei sind die Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung und Kostenfestlegung während des Produktlebenslaufs in der Produktentwicklung am größten (VDMA, 2006), (Schütz, 2008), (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Deshalb ist eine zeitnahe Identifizierung der Lebenszykluskostentreiber bereits während der Anfangsphasen der Produktentwicklung notwendig, um frühzeitig gegensteuern zu können. Die Einbringung der Lebenszykluskosten durch verbindliche Kostenziele zu Beginn einer Produktentwicklung (Design-to-Cost) hat sich heute bereits durchgesetzt (Noske & Kalogerakis, 2009), (Lindemann, 2009). So kann durch die Anwendung des FAS ein Teil der Kosten kontextbasiert von Anfang an in den Produktentwicklungsprozess integriert werden.

Hier steht die Kostenbetrachtung bei Investitionsgütern im Fokus, die nicht nach der Produktentwicklungsphase enden soll, sondern die Kostenverursacher aus der Nutzungsphase einbezieht. Die Lebenszykluskosten, die im Rahmen von dem FAS zurückgeführt werden, sind die Betriebskosten und Instandhaltungskosten. Nach LCC lassen sich diese Kosten folgendermaßen klassifizieren (DIN\_60300, 2005):

- **Betriebskosten:**
  - Einmalige Kosten – Erstschtulung der Mitarbeiter, Anlagen, spezielle Werkzeuge,...
  - Wiederkehrende Kosten – Lohn, Verschleißteile, Verbrauch,...

- **Instandhaltungskosten:**

- Einmalige Kosten – Ersatzteileerstbedarf, Prüfgeräte und Werkzeuge
- Wiederkehrende Kosten – Lohn, Ersatzteile, Dokumentation,...
- Austausch von lebensdauerlimitierten Teilen (wiederkehrend oder einmalig)
- Folgekosten aufgrund von Verlusten (Produktion oder Einkommen) durch Ausfall der Maschine

Für das FAS werden hauptsächlich die wiederkehrenden Kosten berücksichtigt. Die Betriebskosten haben allgemein den deutlich höheren Anteil als die Instandhaltungskosten (Schweiger, 2009). Zu den Betriebskosten zählen auch die Kosten für Datenübertragung oder Softwareupdates im Jahr, diese werden aber aufgrund der Tatsache, dass sie keinen Bezug zur Produktverbesserung haben, hier nicht betrachtet. Das gilt auch für die Personalkosten des Kunden, die notwendig sind, um die Maschine zu betreiben. Der Verbrauch wird zwar berücksichtigt, hierbei aber eine mengenabhängige Betrachtung durchgeführt. Dabei gilt: je höher der Verbrauch, desto höher auch die Kosten. Aufgrund des ökologischen Anspruches der Produktentwicklung und der damit verbundenen Kosten ist es grundsätzlich das Ziel, diese möglichst gering zu halten. Sie werden wie die Sensoren als Verlauf über die Zeit einbezogen.

Im Fokus stehen die Kosten aus der Instandhaltung, da hier der größte Einfluss auf die Produktentwicklung zu erwarten ist. Die Personalkosten sind abhängig von der Komplexität und dem Wartungsaufwand der Anlage. Zum einen müssen Mitarbeiter vorhanden sein, die die Maschine in Stand halten. Diese sind wiederkehrende Personalkosten, die abhängig von der Maschine und ihrem Zustand sind. Nimmt die Lebenszeit der Maschine zu, werden die Wartungsintervalle kürzer und der Personalaufwand und die damit verbundenen Kosten nehmen zu. Zudem gibt es die fixen Personalkosten. Diese Kosten sind jeden Monat dieselben und setzen sich aus den Mitarbeitern zusammen, die zur Überwachung und Koordination der Fertigung und Instandhaltung benötigt werden. Diese Kosten sind nicht direkt von der Produktentwicklung beeinflussbar. Der Produktentwickler muss allerdings die Verfügbarkeitsanforderungen der Kunden erfüllen. Durch die vorbeugende Instandhaltung werden die Bauteile nicht bis zu ihrem Lebensende betrieben und werden, bevor ihr Abnutzungsvorrat unterschritten wird, ausgetauscht. Dieses Vorgehen ist zu empfehlen, da dadurch weniger ungeplante Ausfallkosten entstehen. Die Ausfallkosten durch einen Produktionsstillstand sind in der Regel wesentlich höher als die regelmäßige Instandhaltung einzelner Bauteile. Durch standardisierte Bauteile ist es möglich, keine teuren Einzelanfertigungen einkaufen zu müssen, sodass Ersatzteile schneller und günstiger besorgt werden können. So können zu der Instandhaltung, ähnlich der zuvor definierten Kennzahlen zu den Zeiten, Durchschnittskosten berechnet werden. Hierzu werden u.a. die Kosten der Ersatzteile ( $E_{Kost}$ ), der Personalkosten ( $P_{Kost}$ ) und der Servicemaßnahmen ( $S$ ) angewandt, zur Umsetzung der folgenden Formeln:

**Formel 5: Gesamte Kosten der eingesetzten Ersatzteile:**  $GKE = \sum E_{Kost}$

**Formel 6: Durchschnittliche Kosten der eingesetzten Ersatzteile:**  $DKE = \frac{GKE}{Anzahl\ S}$

**Formel 7: Gesamte Kosten des Servicemitarbeiters:**  $GKP = \sum P_{Kost}$

**Formel 8: Durchschnittliche Kosten des Servicemitarbeiters:**  $DKP = \frac{GKP}{Anzahl\ S}$

**Formel 9: Durchschnittliche Kosten der Servicemaßnahme:**  $DKS = DKE + DKP$

**Formel 10: Gesamt Kosten der Servicemaßnahme:**  $GKS = GKE + GKP$

Daraus ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Kennzahlen die in den Dashboards, mittels verschiedener Diagrammtypen umgesetzt werden:

**Tabelle 14: Kennzahlen der statistischen Analyse**

Zeit	Kosten
Mean Time To Repair (MTTR)	Gesamte Kosten für Ersatzteile (GKE)
Mean Time To Repair Start (MTTRS)	Durchschnittliche Kosten der eingesetzten Ersatzteile pro Servicemaßnahme (DKE)
Mean Repair Time (MRT)	Durchschnittliche Kosten des Servicemitarbeiters pro Servicemaßnahme (DKP)
Zuverlässigkeit	Gesamte Kosten des Servicemitarbeiters (GKP)
Verfügbarkeit	Durchschnittliche Kosten der Servicemaßnahme (DKS)
Verlauf der gemessenen Verbrauchstoffe (wie Strom, Gas,...)	Gesamte Kosten der Servicemaßnahmen über die gesamte Lebensdauer (GKS)
Ausfallrate	Entsorgungskosten
Stillstandzeiten (TBR)	Installationskosten
Fehlerzeiten (TTR)	Kostenverteilung (Lohn, Ersatzteile in %)
Verlauf der gemessenen Sensorwerte	
Störungsfreie Nutzungsdauer	
Nutzungszeit ( $T_{Nutz}$ )	

### 6.1.2 Umsetzung

Die entsprechenden *Dashboards* werden unter Zuhilfenahme des Programms **Pentaho Report Designer (PRD)** erstellt. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Dem Berichtsdokument wird eine Datenquelle hinzugefügt. Da die Beispieldatenbank in *MySQL* umgesetzt wird, erfolgt der Zugriff per entsprechend konfigurierter JDBC-Adapter für SQL Datenbankabfragen.
2. Da nicht alle Daten der DB benötigt werden, besteht die Möglichkeit, die Tabellen festzulegen, die die Datenlieferanten für die zu berechneten Kennzahlen sind.
3. Dann werden mittels des PRD durch Drag und Drop die Anzeigeelemente (z.B. Balkendiagramm, Tabelle) dem Report zugewiesen.



4. Hierzu können dann verschiedene SQL-Statements gesetzt werden, wie Parameter oder Funktion, zur Umsetzung der oben genannten Formeln. Sobald diese so arrangiert und formatiert sind, dass sie ihre enthaltenen Informationen möglichst übersichtlich darstellen, wird der Bericht gespeichert.
5. Die Berichte werden abschließend in der Browserdarstellung des FAS veröffentlicht und in die Navigation eingepflegt.

Am Beispiel der Kostenberechnung sieht das dann wie folgt aus: Zuerst werden die relevanten Tabellen der DB ausgewählt (vgl. Datenmodell in Kapitel 5), auf deren Grundlage die Dashboards berechnet werden. Hier sind das die Tabellen Produkt (ProductInstance), Instandhaltung (Service) und Kosten (SoldComponent). Mittels „Edit Chart“ können dann ein oder mehrere Diagramme in den Report integriert werden. Im PRD stehen verschieden Basistypen (wie Kreis-, Spinnen, Balken oder Punktediagramm) zur Verfügung, die individuell angepasst werden können. Die zuvor beschriebenen Kostenfunktionen (Formel 9, 10) werden umgesetzt, indem die Formel in ein SQL Abfragen transferiert werden, wie das folgende Beispiel zeigt (Schmidt, 2011):

```

SELECT
  (SELECT Product.Name
   FROM ProductInstance
    INNER JOIN Product ON
                                     ProductInstance.idProduct=Product.idProduct
   WHERE idProductInstance=Service.idProductInstance)
  AS ProductName,
  Product.Name AS ComponentName,
  SUM(SoldComponent.Quantity * SoldComponent.UnitPrice
      * (1.0 - SoldComponent.Discount * 0.01))
    / SUM(SoldComponent.Quantity)
    AS AvgTotalCosts,
  SUM(SoldComponent.Quantity * SoldComponent.UnitPrice
      * (1.0 - SoldComponent.Discount * 0.01)) AS TotalCosts,
  SUM(SoldComponent.Quantity) AS TotalQuantity
FROM Service
  INNER JOIN SoldComponent ON SoldComponent.idService=Service.idService
  INNER JOIN Product ON Product.idProduct=SoldComponent.idProduct
WHERE Service.idServiceType IN (${ServiceTypes})
  AND SoldComponent.idProduct NOT IN
      (SELECT idProduct FROM ServiceEmployee WHERE idProduct IS NOT NULL)
  AND Service.idProductInstance IN (${ProductInstances})
GROUP BY SoldComponent.idProduct
UNION
SELECT
  NULL AS ProductName,
  'Arbeitszeitstunde' AS ComponentName,
  SUM(SoldComponent.Quantity * SoldComponent.UnitPrice
      * (1.0 - SoldComponent.Discount * 0.01))
    / SUM(SoldComponent.Quantity)
    AS AvgTotalCosts,
  SUM(SoldComponent.Quantity * SoldComponent.UnitPrice
      * (1.0 - SoldComponent.Discount * 0.01)) AS TotalCosts,
  SUM(SoldComponent.Quantity) AS TotalQuantity
FROM Service
  INNER JOIN SoldComponent ON SoldComponent.idService=Service.idService
  INNER JOIN Product ON Product.idProduct=SoldComponent.idProduct
WHERE Service.idServiceType IN (${ServiceTypes})
  AND SoldComponent.idProduct IN
      (SELECT idProduct FROM ServiceEmployee WHERE idProduct IS NOT NULL)
  AND Service.idProductInstance IN (${ProductInstances})

```

Die Instandhaltungskosten und Produktinstanzen werden per Parameter bestimmt. Der erste Teil dieser Verbundabfrage berechnet alle Kosten für in der Produktinstanz verbaute Ersatzteile, während der zweite Teil alle durchgeführten Arbeitsstunden aufsummiert und in Kosten umwandelt.

Der fertige Report kann sodann gespeichert und veröffentlicht werden. Zur Navigation innerhalb des FAS wird der Pentaho-Server und die damit verbundene Möglichkeit zur Nutzung eines Browsers verwendet. Dadurch besteht die Möglichkeit, von überall her auf das DWH zuzugreifen. In der Abbildung 24 ist das realisierte Dashboard dargestellt. Auf der linken Seite ist der Navigationsbereich des FAS, wo im ① oberen Bereich zwischen den verschiedenen Modulen navigiert werden kann. Hier ist die Analyse ausgewählt worden, wozu verschiedene Reports zu Ausfallverhalten, Kosten, Messwerten und Service hinterlegt wurden. Die verfügbaren Reports werden im unteren Bereich der linken Seite angezeigt ②, hier *Produktinstanz Kosten* und *Quartalskosten Übersicht*, die ausgewählt werden können.



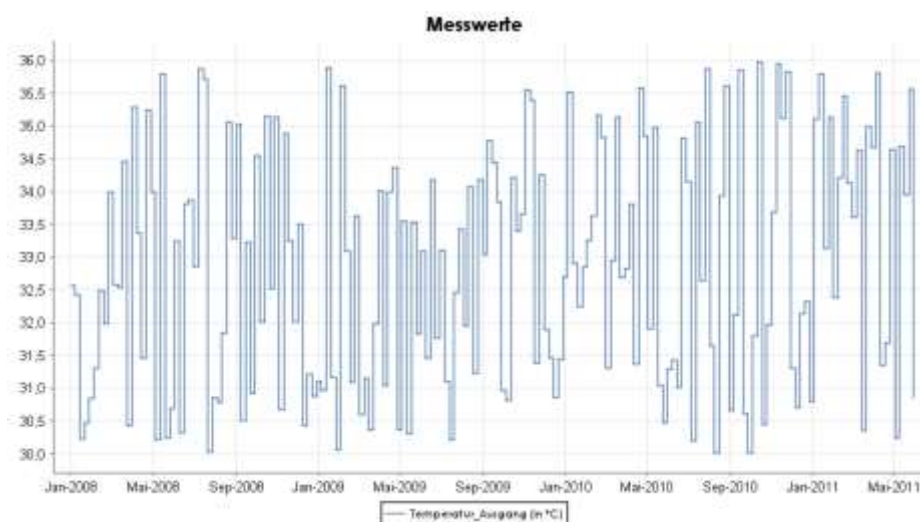
Abbildung 24: Analyse der Kosten (Dienst et al., 2014)

Auf der rechten Seite ist der geöffnete Report abgebildet, wo im oberen Bereich immer verschiedene Varianten zur Auswahl durch den Produktentwickler zur Verfügung stehen. Die Varianten werden direkt aus den Datenbanken gezogen und sind daher dynamisch. In

dem dargestellten Beispiel wird zwischen den verschiedenen Servicearten (Inspektion, Instandhaltung,...) <sup>3</sup> und den Produktinstanzen <sup>4</sup>, denen zugeordnet die Kosten berechnet werden, selektiert. Es können auch mehrere Instanzen ausgewählt werden.

Sobald eine Auswahl getroffen wird, werden die Kennzahlen automatisch berechnet und die Verteilungen werden in den Diagrammen visualisiert. Hier sind die Kennzahlen dargestellt „Anzahl der eingesetzten Ersatzteile“, „Gesamt- und Durchschnittliche Kosten der Servicemaßnahmen“ und die „Kostenverteilung“ dargestellt <sup>5</sup>.

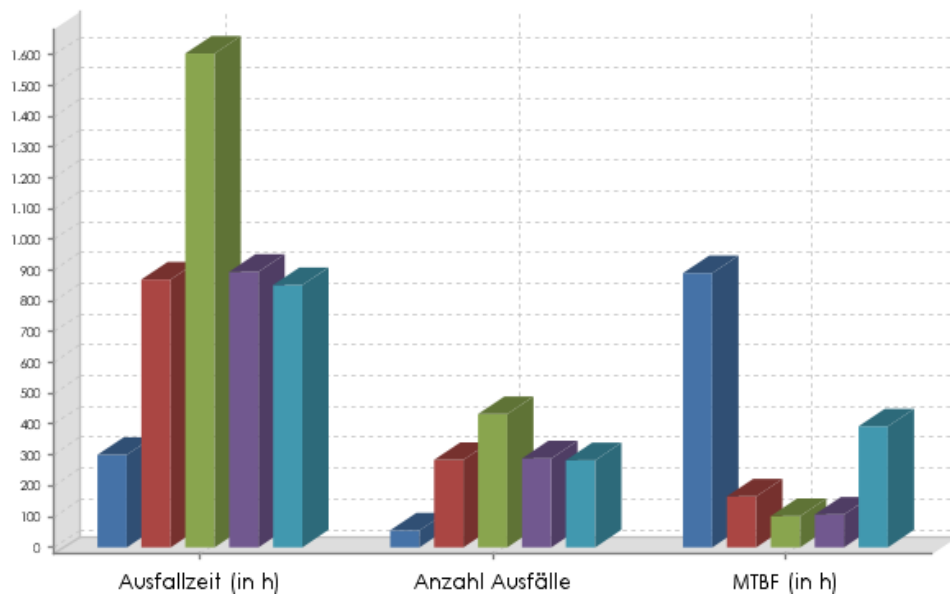
In den folgenden Abbildungen ist eine Auswahl der umgesetzten Dashboards dargestellt, wobei der Fokus hier auf der graphischen Darstellung liegt. Die Auswahl der Instanzen und Werte ist mit der in Abbildung 24 zu vergleichen. Die umgesetzten SQL Abfragen hingegen sind speziell für jede Kennzahl umgesetzt worden und auch die Art der Darstellung variiert.



**Abbildung 25: Verlauf der Messwerte Temperatur**

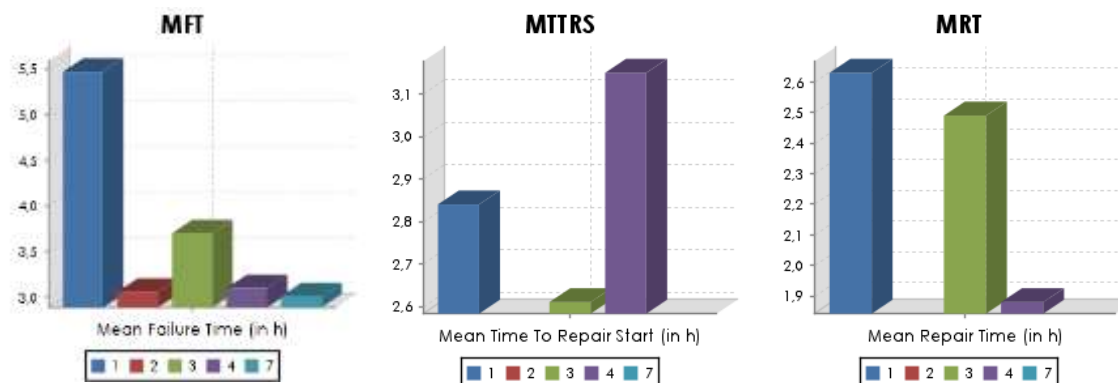
In der Abbildung 25 ist eine Übersicht über den Verlauf der Sensordaten, die wöchentlich zusammengefasst werden, zu sehen. Als Beispiel ist hier der Sensor Temperatur bei einer Radialkreiselpumpe ausgewählt worden. Die gemessenen Werte sind nicht konstant, sondern verlaufen zw. 30 und 36 °C, was somit die Grenzwerte sind. Eine Verbindung zu Fehlern ist hier noch nicht hergestellt worden, hierzu wird dann später das Diagnosemodell aufgesetzt.

Die Daten zur Zuverlässigkeit (Abbildung 26) der Maschine sind mittels Balkendiagrammen dargestellt. Jeder der Balken steht dabei für eine Instanz einer Produktgeneration. So ist beispielsweise die Ausfallzeit bei der Instanz 3 (grün) mit 1600 Stunden bei einer Betriebszeit von 45652,44 Stunden am höchsten, die Anzahl der Ausfälle dabei 430 auch und die mittlere Zeit zwischen Fehlern (MTBF) liegt bei 100 h. Diese Daten sind der in dem Report selbst dargestellten Tabelle zu entnehmen. So schneidet diese Lösung auf den ersten Blick sehr schlecht ab. Ansonsten wird noch die Zeit erfasst, die der Mitarbeiter benötigt, um den Fehler zu beheben und die Maschine zu reparieren (*MRT*).



**Abbildung 26: Daten zur Zuverlässigkeit**

Eine weitere zeitbasierte Kennzahl, die die Instandhaltung selbst betrifft, ist die gesamte Fehlerzeit (*MFT*) (siehe Abbildung 27). Diese Kennzahl wird dann nochmal auf gesplittet in die Zeit, die es dauert, bis die Instandhaltungsmaßnahme durch den Servicemitarbeiter gestartet wird (*MTTRS*). Je nach Fehler kann es sein, dass die Maßnahme direkt durch den Maschinentreiber behoben werden kann, sodass dann kein Servicemitarbeiter und damit verbunden keine Daten dazu erfasst werden. Die Kennzahlen werden in Stunden erfasst und dargestellt, wobei es sich um durchschnittliche Zeiten über den gesamten Betrieb handelt.



**Abbildung 27: zeitbasierte Kennzahlen der Instandhaltung: MFT, MTTRS und MRT**

Anhand der dargestellten Dashboards ist gezeigt worden, dass diese quantifizierbare Werte darstellen, die im Kontext der Produktverbesserung zur Evaluierung der Anforderung angewandt werden können. Die intuitive Darstellung ist direkt verständlich und der Produktentwickler benötigt zur Anwendung des FAS keine Kenntnisse zu Datenbanken. Bei Nichterfüllung dieser wird sodann eine Produktverbesserung ausgelöst und/oder Anforderungen werden angepasst.

## 6.2 Aufdeckung von Schwachstellen

Betrachtet man die Art der Feedbackdaten, so können unterschiedliche Arten von Daten durch die Produktionsmaschine zurückgeliefert werden. Grundvoraussetzung ist dabei die Möglichkeit der Abbildung dieser durch eine WRM vgl. Kapitel 2.4. Dabei soll die spätere Repräsentation objektiv sein, d.h. dass die Erstellung der WRM weit möglichst automatisch ablaufen muss durch maschinelles Lernen. Dieses wird zur Musteraufdeckung in großen Datenbeständen genutzt und lässt sich dem Data Mining zur Erstellung einer WRM zuordnen (Alpaydin, 2010). Maschinelles Lernen hat den Vorteil, dass große Datenmengen analysiert und zusammengefasst werden können. Ansonsten wäre die manuelle Ermittlung aufgrund der großen Anzahl von Daten zudem sehr mühsam (Ertel, 2013). Des Weiteren müssen aus dem repräsentierten Wissen Schlussfolgerungen (Inferenzen) gezogen werden können, die den Produktentwickler bei der Diagnose unterstützen. Bei der Umsetzung muss es möglich sein, die einzelnen Daten von Produktinstanzen zusammenzuführen, um eine allgemeine Aussage zu einer Produktgeneration abzuleiten da stets die gesamte Generation verbessert werden soll, nicht nur eine Instanz.

Als WRM wurden daher **Bayes'sche Netze** (BN) ausgewählt. Diese stammen aus dem Feld der Künstlichen Intelligenz (Salini & Kenett, 2009). Das Bayes-Theorem nutzt bedingte Wahrscheinlichkeiten, um über Rückwärtsinduktion von Ereignissen auf Ursachen zu schließen (Bergmann, 2010). Zudem hat sich die Eignung der BN in diesen Kontext bereits gezeigt (Neubach, 2010). So stellt dieses Konzept eine Möglichkeit dar, zu erklären, unter welchen Bedingungen beispielsweise ein Defekt bei einer Maschine eintritt. Die Vorteile der BN sind eine leicht verständliche Visualisierung und die Möglichkeit, zur Ableitung von Fehlerursachen Schlussfolgerungen durchzuführen. Zudem werden die Anforderungen nach maschinellem Lernen und visueller Darstellung von Wissen durch die Methode erfüllt. Gerade das maschinelle Lernen ist für die Generierung von objektivem Feedback entscheidend, da so automatisiert, ohne subjektive Einflüsse durch die Benutzer des Assistenzsystems, aus den Feedbackdaten ein BN durch Anwendung eines Lernalgorithmus gelernt wird. BN haben generischen Charakter und sind daher nicht auf die Verarbeitung einer bestimmten Art von Eingangsdaten beschränkt. Die Auswahl der BN, im Kontext der Produktentwicklung, ist in verschiedenen Publikationen (Dienst et al., 2010), (Abramovici et al., 2011) und (Dienst et al., 2011) evaluiert worden.

### 6.2.1 Bayes'sche Netze

Ein BN ist ein graphisches Modell, das einen Satz von Variablen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen repräsentiert (Pearl, 1988), (Jordan, 1999), (Jensen & Nielsen, 2007), (Jiang & Cooper, 2010). BN sind nach dem Mathematiker T. Bayes benannt worden, der die Grundlagen für das Verfahren gelegt hat (Bayes, 1763).

**Definition:** Ein Bayes'sches Netz  $BN = (\mathbf{G}, \boldsymbol{\theta})$  für eine Menge  $\mathbf{V} = \{V_1, \dots, V_n\}$  von Zufallsvariablen besteht aus zwei Teilen (Salini & Kenett, 2009), (Russell & Norvig, 2012):

Einem *gerichteten azyklischen Graphen* (kurz DAG)  $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ , dessen Knoten den Zufallsvariablen entsprechen und jeder gerichtete Kanten einem Satz von bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilung (Pourret et al., 2008), (Ertel, 2013). Man spricht von  $\mathbf{G}$  als der Struktur

---

von **BN** (Beierle & Kern-Isberner, 2008), wobei jede Zufallsvariable endlich viele Werte annehmen kann (Jensen, 2001), (Ertel, 2013).

Zu jedem Knoten gibt es ein *Conditional Probability Table* (CPT), diese enthält die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung, die modelliert wird durch die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller über Kanten verbundener Knoten (Ertel, 2013). Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung, lässt sich wie folgt berechnen (Kruse et al., 2011):

**Formel 11: Bayes' Theorem**

$$P(V) = \prod_{i=1}^n P(V_i | pa(V_i))$$

wobei  $pa(V_i)$  für den Satz von Eltern von  $V$  steht (Borgelt & Kruse, 2002), (Jensen & Nielsen, 2007). Die Formel zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit des aktuellen Knoten von der Wahrscheinlichkeit der Vorgänger oder Elternknoten abhängt. Das liegt daran, dass das BN ein gerichteter Graph ist und somit die Beziehungen so gesetzt sind, dass die Elternknoten Einfluss auf die Kinds-knoten haben und nicht umgekehrt (Ben-Gal, 2007), (Al-Hames, 2008). Besitzt ein Knoten  $V_i$  keine Elternknoten, dann liegt eine lokale Wahrscheinlichkeitsverteilung vor und seine CPT beinhaltet die unbedingten Apriori-Wahrscheinlichkeiten.

Mit der Formel von Bayes lässt sich somit die Regel der Form

„Wenn die Daten **B** gegeben sind tritt das Ereignis **A<sub>i</sub>** mit einer Wahrscheinlichkeit von **X%** ein“

festlegen.

Daraus wird die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(A_i|B)$  berechnet. Die bedingte Wahrscheinlichkeit gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Hypothese  $A_i$  bei gegebenen Daten  $B$  gilt. Sie wird aufgrund der Apriori-Wahrscheinlichkeiten  $P(A_i)$  und  $P(B)$  sowie der bedingten Wahrscheinlichkeiten von Daten bei Vorliegen einer bestimmten Hypothese berechnet. Die abgeleiteten Schlussfolgerungen bei einem BN werden in der künstlichen Intelligenz zum Schließen unter Unsicherheit zugeordnet (Ertel, 2013). Hierzu zur Veranschaulichung das folgende Beispiel zur Berechnung:

Angenommen aufgrund von Fieber (B) möchte ein Arzt darauf schließen, welche Krankheit (hier Erkältung ( $A_1$ ) oder Malaria ( $A_2$ )) die Ursache ist. Sei die Apriori- Wahrscheinlichkeit von Fieber gleich 0,4 und die Apriori- Wahrscheinlichkeit von Erkältung = 0,3. Die Wahrscheinlichkeit, dass jemand, der Fieber hat, die Erkältung hat  $P(A_i|B)$  sei 0,6. Also errechnet sich die Wahrscheinlichkeit für die Regel:

*Wenn man Fieber hat, hat man mit einer Wahrscheinlichkeit von **x** Erkältung.*

$$P(\text{Erkältung}|\text{Fieber}) = \frac{0,6 \cdot 0,3}{0,4} = \mathbf{0,45}.$$

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 45 % kann also bei Vorliegen von Fieber auf Erkältung geschlossen werden. Der andere Fall, in dem Fieber aufgrund von Malaria vorhanden ist,

---

sieht wie folgt aus: Es sei die Apriori-Wahrscheinlichkeit von Fieber gleich 0,4 und die Apriori-Wahrscheinlichkeit von Malaria = 0,00000019. Die Wahrscheinlichkeit, dass jemand, der Fieber hat, an Malaria erkrankt ist,  $P(A_i|B)$  sei 0,0000079. Also errechnet sich die Wahrscheinlichkeit für die Regel:

*Wenn man Fieber hat, hat man mit einer Wahrscheinlichkeit von x Malaria.*

$$P(\text{Malaria}|\text{Fieber}) = \frac{0,0000079 \cdot 0,00000019}{0,4} = 0,0000000000037525.$$

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,000000000037525% kann bei Vorliegen von Fieber auf Malaria geschlossen werden. Es zeigt sich, dass bei dem gleichen Symptom (Fieber), das auch mit gleicher Wahrscheinlichkeit eintritt, die Wahrscheinlichkeit für die Krankheiten sehr stark voneinander abweichen. Das liegt daran, dass die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der Krankheiten sehr unterschiedlich sind. So ist die Erkältung eine Krankheit, die in unseren Breiten sehr viel häufiger vorkommt als Malaria. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit auch hoch, dass ein Mensch an Erkältung erkrankt. Mit dem Satz von Bayes wird eine Rückwärtsrechnung durchgeführt, bei der im Vordergrund steht, die Ursache herauszufinden und nicht das Ereignis, was auch das Ziel ist bei dem Einsatz des BNs in der Produktentwicklung. Wie sich gezeigt hat, lässt sich aus den Regeln nicht mit Sicherheit sagen, was die Ursache für ein Symptom ist, es lassen sich nur Schlussfolgerungen auf die wahrscheinlichste Ursache ziehen. Hier ist also zu dem Ereignis Fieber die wahrscheinlichste Ursache (Erkältung) identifiziert worden, woraufhin der Arzt die Diagnose stellen konnte und die entsprechenden Maßnahmen (Medikament) einleiten kann. Der Vorteil ist dabei allerdings, dass die bekannten Ursachen aufgezeigt werden, auch wenn diese sehr unwahrscheinlich sind. Für den Arzt ist das dann von Vorteil, wenn sich herausstellt, dass die gestellte Diagnose falsch ist, wenn also die wahrscheinlichste Ursache ausgeschlossen wurde.

Der Vorteil von BN ist aber nicht nur die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung, u.a. das Bayes Theorem, sondern auch die graphische Darstellung. In der Abbildung 28 ist ein einfaches BN mit drei Knoten zusehen, indem es darum geht zu zeigen, wie sich das Wetter und Grillen auf die Stimmung einer Gruppe von Personen auswirken können.

Es gibt eine gerichtete Beziehung von den Knoten **Wetter (W)** und **Grillen (G)** (Elternknoten) zum Knoten **Stimmung (S)** (Kindsknoten). An den Knoten stehen die dazugehörigen CPTs, in denen die bedingten Wahrscheinlichkeiten den Attributen zugeordnet stehen. Der Knoten Wetter hat die Attribute *Sonne* und *Regen*. Aus der Tabelle lässt sich ablesen, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 70% die Sonne scheint und dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 30% regnet. Das sind dann die Apriori-Wahrscheinlichkeiten, die z.B. auf Basis einer Expertenmeinung (z.B. der Wettervorhersage) oder aufgrund gesammelter Daten aus der Vergangenheit abgeleitet werden. Genauso lässt sich die CPT des Knotens Grillen lesen. Am Knoten Stimmung gibt es zwei Tabellen, einmal die „große“ Tabelle, deren Spalten sich aus den Elternknoten ergeben. Dahinter sind die Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, wenn die Stimmung gut bzw. schlecht ist. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung ist z.B. das Ergebnis einer Umfrage. Hier zeigt sich auch die Abhängigkeit der Eltern-

---

knoten zu den Kinds-knoten, so wird die bedingte Wahrscheinlichkeit nur in Richtung der Pfeile übertragen.

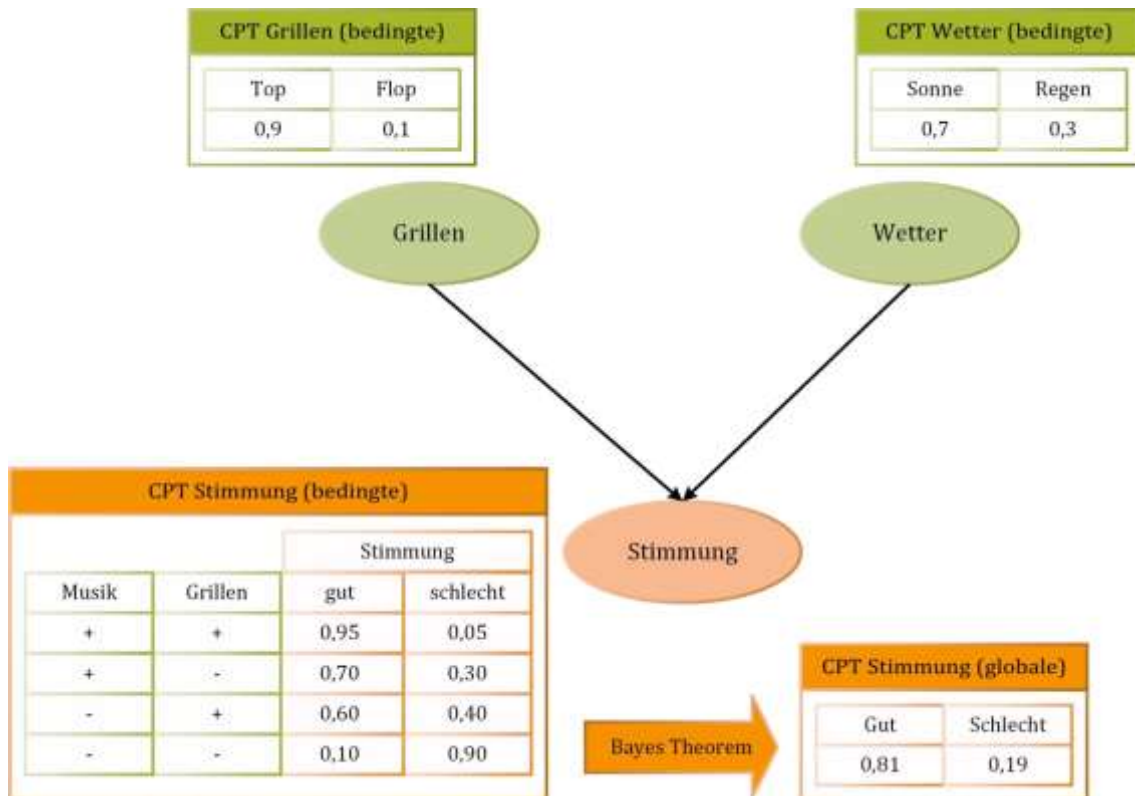


Abbildung 28: Beispiel für die graphische Darstellung eines BN

So kann man dann die folgenden Entscheidungsregeln ableiten: *Wenn die Sonne scheint und das Grillen Top ist, dann ist die Stimmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% gut.* Die andere Tabelle am Knoten Stimmung zeigt die CPT, die sich bei Anwendung der *Formel 11: Bayes' Theorem* ergibt. Die allgemeine Formel sieht dann wie folgt aus:

$$P(S) = \sum_i P(S | M_i, G_i) \cdot P(M_i) \cdot P(G_i).$$

Für den Fall Stimmung = gut sieht die Formel wie folgt aus:

$$P(S_{gut}) = P(S | G_{Top}, W_{Sonne}) \cdot P(G_{Top}) \cdot P(W_{Sonne}) + P(S | G_{Top}, W_{Regen}) \cdot P(G_{Top}) \cdot P(W_{Regen}) + P(S | G_{Flop}, W_{Sonne}) \cdot P(G_{Flop}) \cdot P(W_{Sonne}) + P(S | G_{Flop}, W_{Regen}) \cdot P(G_{Flop}) \cdot P(W_{Regen})$$

Die dazugehörigen Werte werden aus den CPTs in dem BN abgelesen und führen zu folgendem Ergebnis (Dienst, 2009):

$$P(S_{gut}) = 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,7 + 0,6 \cdot 0,9 \cdot 0,3 + 0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,7 + 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 0,8125.$$

Bei der gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung ist also die Stimmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 81% gut. Analog dazu wird die Wahrscheinlichkeit für eine schlechte Stimmung berechnet (Dienst, 2009):

$$P(S_{schlecht}) = \sum_i P(S_{schlecht} | G_i, W_i) \cdot P(G_i) \cdot P(W_i).$$



$$P(S_{schlecht}) = 0,05 \cdot 0,9 \cdot 0,7 + 0,4 \cdot 0,9 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 + 0,9 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 0,1875.$$

Auf diese Weise erhält man also die gemeinsame oder globale Wahrscheinlichkeitsverteilung des BN. Diese Werte sind nicht konstant, sondern ändern sich in Abhängigkeit von den Wahrscheinlichkeiten der Elternknoten. Wenn die Regenwahrscheinlichkeit beispielsweise auf 60 % steigt, ändert sich die Wahrscheinlichkeit für eine gute Stimmung von 81 % auf 70 %, für eine schlechte Stimmung entsprechend auf 30 %. Auf Basis der Darstellung können die Zusammenhänge intuitiv verstanden werden, ohne weitere Kenntnisse zu den Grundlagen dahinter zu haben. Durch die gerichteten Kanten sieht man direkt, dass die Stimmung durch das Wetter und Grillen beeinflusst wird.

### 6.2.2 Erstellung von BN

Zur Erstellung eines BN ist eine Interaktion des Produktentwicklers mit dem Assistenzsystem erforderlich. Der Produktentwickler wählt hierbei die Feedbackdaten einer oder mehrerer Instanzen bzw. eine Komponente einer Produktgeneration aus, wie z.B. das Lager 1 der Pumpe X, um die Fehlerursachenermittlung zu starten. Das Ziel ist es, Regelmäßigkeiten in den Feedbackdaten zu erkennen, um in diesem Falle eine Diagnose von Fehlerursachen durchführen zu können. Der Prozess zur Generierung eines BN teilt sich folgende Schritte auf:

- 1) Selektieren der Feedbackdaten,
- 2) Vorverarbeiten der Daten (hierzu gehört die Einteilung in Intervalle)
- 3) Anwendung eines Lernalgorithmus und
- 4) Archivierung des BNs im XML Format

Die Generierung selbst erfolgt durch das Tool „*Waikato Environment for Knowledge Analysis* kurz *WEKA*“, wodurch zusätzlich verschiedene Data Mining- und Visualisierungsmethoden zur Verfügung stehen (Witten et al., 2011).

Der gesamte Prozess kann manuell oder automatisiert mit Hilfe des Knowledge Flows von WEKA umgesetzt werden. Der *Knowledge Flows* (KF) Editor ist Bestandteil der grafischen Oberfläche von WEKA und dient dem Erzeugen von Verarbeitungsprozessen, die andernfalls immer wieder von Hand angestoßen werden müssten (Witten et al., 2011). Innerhalb des KF werden hier die Einstellungen zur Generierung des BNs gespeichert, um diese dann automatisiert durchzuführen, was eine Vereinfachung für den Produktentwickler bedeutet. Der umgesetzte KF (vgl. Abbildung 29) ist prozessorientiert aufgebaut. Die Darstellung des Verarbeitungsprozesses als Flussdiagramm ist sehr übersichtlich und trägt maßgeblich zum Verständnis der Prozessstruktur bei. Zudem werden die Einstellungen und die Abfolge der Datenverarbeitung des dargestellten KF gespeichert, sodass die Ergebnisse reproduziert werden können.

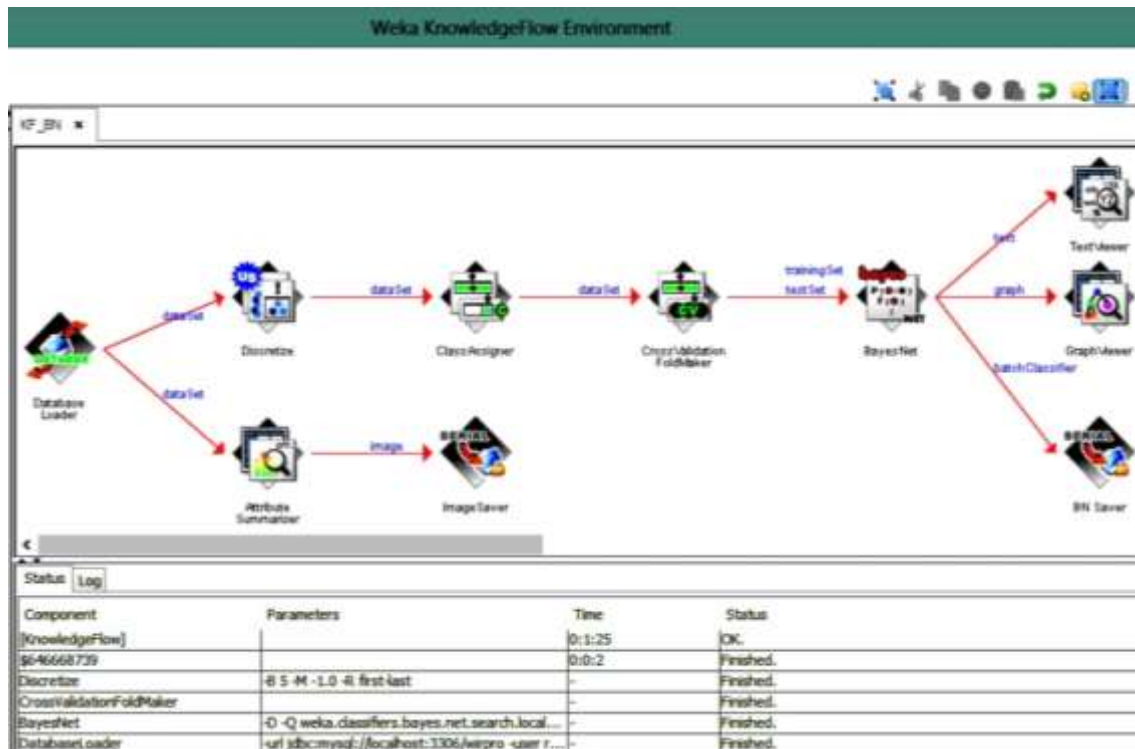


Abbildung 29: KF in WEKA zur automatischen Generierung eines BN

Dabei sind folgende Schritte mittels KF umgesetzt worden:

### 6.2.2.1 Verbindung zu MySQL DB

Zu Anfang wird eine Verbindung zu der Datenbank des FAS umgesetzt. Hierfür steht der *MySQL Loader* direkt am Beginn des Prozesses in Abbildung 29, wo eine Verbindung mittels URL zu der FAS DB hergestellt wird und mittels SQL-Befehlen genau die Spalten mit den Feedbackdaten selektiert werden, zu denen das BN dann gelernt wird (Dienst et al., 2011). Bei dem umgesetzten Testszenario hat sich gezeigt, dass aufgrund der Limitation durch das Tool WEKA aus max. 150.000 Datensätzen (1 Datensatz = 1 Zeile der Tabelle) ein BN gelernt werden kann. Es können auch verschiedenen Datenquellen gesetzt werden, wobei der Rest des KF unverändert bleibt. Hierdurch kann dann zu verschiedenen Maschinen ein individuelles BN gelernt werden. Dabei besteht auch die Möglichkeit, mehrere BN durch den Einsatz eines Aggregationsalgorithmus zu einem zu aggregieren, im Falle der BN der Linear Opinion Pooling (Dienst, 2009).

### 6.2.2.2 Formatierung der Feedbackdaten

Die selektierten Daten werden in den *KF* geladen und können durch die *weka.filters* in ausgewählte Intervalle gruppiert werden (Bouckaert, 2008), (Witten et al., 2011). Die Filter werden dazu eingesetzt, die Daten für das maschinelle Lernen vorzubereiten. Hier werden die Daten transformiert, z.B. durch die Entfernung oder Hinzunahme von Attributen (Witten et al., 2011). Dabei werden die Filter in überwachte (*supervised*) und unüberwachte (*unsupervised*) eingeteilt, die dann beide nochmal unterteilt werden in instanz- und attributbasiertes Filtern (Witten et al., 2011).

Hier werden die Variablen mittels eines „*unsupervised attribute Discretize*“ Filter in max. 5 Intervalle eingeteilt, um eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten. Hierfür steht in KF Prozess „*Discretize*“. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie die Größen der Intervalle gewählt werden können, von einer gleichmäßigen Verteilung der Daten auf alle Intervalle bis hin zu einer Einteilung über den Messbereich. Dieser ist hier gewählt worden, da so die Häufigkeitsverteilungen, z.B. ob eine Temperaturwert häufig im hohen Bereich liegt, besser veranschaulicht werden kann. Von „*Discretize*“ führen zwei Kanten mit Datensätzen weg, der eine zur Fertigstellung des Generierungsprozess des BN und der andere zu „*AttributeSummerizer*“. Mittels dieses Objekts können die Verteilungen als Balkendiagramme eingesehen werden. Hier kann direkt gesehen werden, wie die die Häufigkeitsverteilung zu einem Datensatz aussieht.

Der nächste Schritt „*ClassAssigner*“ steht dann für die Auswahl eines Klassenattributes, um festzulegen, welches es bei den eingehenden Daten ist. Wenn es das Ziel ist, die Ursache des Defektes zu ermitteln ist es z. B. Defekt. Nun werden die Anzahl der „*Folds*“ in „*Cross-ValidationFolder*“ festgelegt. Dadurch wird die Anzahl der Testsätze und somit Durchläufe des Lernalgorithmus festgelegt, der bei diesem bei fünf liegt.

### 6.2.2.3 Lernalgorithmus

Das BN wird mittels eines Lernalgorithmus erzeugt, Stichwort *maschinelles Lernen* bzw. *Data-Mining*. Bei den BN wird das Grundsätzlich geteilt in (Ertel, 2013):

- Lernen der graphischen Struktur und
- Lernen der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt in der Häufigkeitsermittlung der Feedbackdaten. So wird hier „gezählt“, wie oft z.B. die Temperatur in einem Intervall zwischen 10°C und 15°C Grad liegt und wie oft in den anderen. Dies zu ermitteln ist nicht anspruchsvoll und somit nicht problematisch bei der automatischen Erstellung eines BNs. Auch die globale Wahrscheinlichkeitsverteilung lässt sich durch die Anwendung des Bayes Theorem berechnen. Schwieriger ist es hingegen bei der Ermittlung der Struktur des Netzwerks. Hierzu ist es notwendig, eine ausreichend große Anzahl an Daten und einen geeigneten Lernalgorithmus zur Verfügung zu haben. Das Finden der optimalen Struktur des Netzes lässt sich als Suchproblem formulieren (Ertel, 2013). Gesucht ist ein DAG, der die auf den Daten basierte Wahrscheinlichkeitsverteilung möglichst gut wiedergibt (Ertel, 2013). Hierzu werden heuristische Verfahren angewandt. Diese sind aber aktuell nicht für größere Netze einsetzbar, daher wird in diesem Zusammenhang Forschung zur Entwicklung eines geeigneten Lernverfahren bzw. Algorithmus betrieben (Ertel, 2013).

In WEKA sind für BN Lernalgorithmen wie LADG Hill Climbing, K2 etc. verfügbar (Jiang & Cooper, 2010), (Witten et al., 2011). Somit kann aus den vorverarbeiteten Daten automatisch ein BN gelernt werden. Hierfür steht das Element „*BayesNet*“, wo ein Verfahren an die Anforderungen des FAS ausgewählt und angepasst wird. Hierbei sind verschiedene Einstellungen vorzunehmen, wie die maximale Anzahl der möglichen Elternknoten. Das gelernte BN liegt nun in einer xml-Datei vor, die gespeichert wird. Dies wird automatisch umgesetzt durch den „*BN Saver*“, wo die Zieladresse zur Ablage der xml-Datei hinterlegt wird. Um den Graph zu visualisieren ist der „*GraphViewer*“ von WEKA genutzt.

---

### 6.2.3 BN am Beispiel der hydraulischen Strömungsmaschinen

Jeder Knoten des BNs entspricht einer Variable, d.h. einem Messpunkt (Datentabelle der FAS DB) der Maschine, hier das Lager der Pumpe. Die grünen Balken (Abbildung 30) an den Knoten entsprechen den Ausprägungen der Attribute, was hier den Intervallen entspricht, und zeigen die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Werte hinter den grünen Balken stehen für die ermittelte Häufigkeit in Prozent der CPTs, wobei hier nur die globalen Werte dargestellt sind.

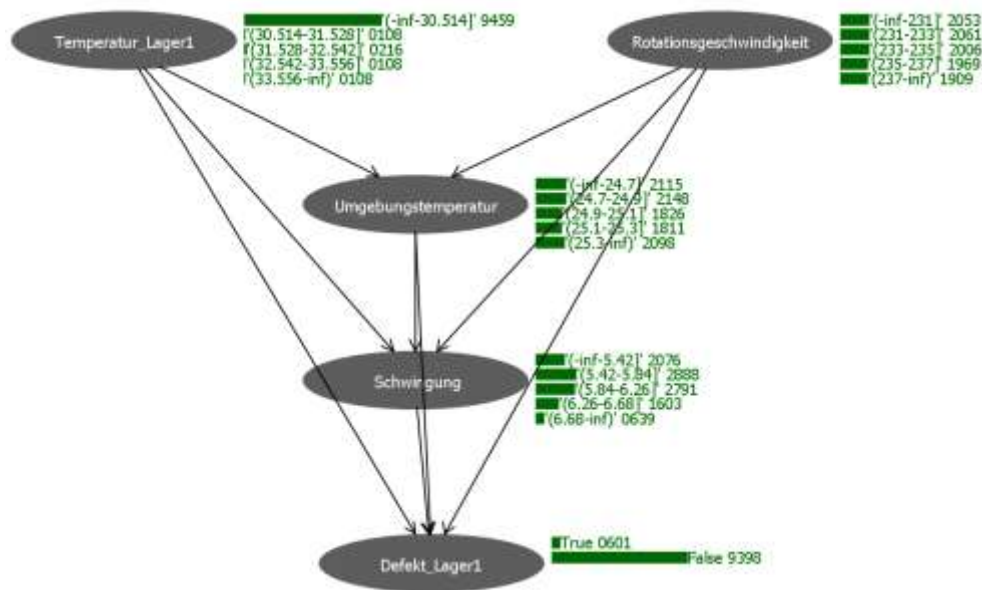


Abbildung 30: BN zu dem Lager der Radialkreiselpumpe

Die Repräsentation des BN alleine hilft dem Produktentwickler noch nicht, entscheidend ist die Fähigkeit, Schlussfolgerungen (Inferenzen) aus dem vorhandenen Wissen zu ziehen (Beierle & Kern-Isberner, 2008). Ziel eines BN ist die Umkehr des Ursachen-Wirkungs-Prinzips (Bergmann, 2010), so kann aus bekannten Ereignissen die wahrscheinlichste Ursache berechnet werden, um damit den Anwendungsfall 2 umzusetzen. Das wird durch eine What-If Analyse zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Ursachen eines Defektes erreicht. Dazu wird das BN mit dem WEKA „BN Editor“ geladen, wo Evidenzen gesetzt werden können (Dienst et al., 2010). Evidenz heißt, das der Zustand, z.B. Defekt tritt ein, mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% erreicht wird. Das Setzen einer Evidenz hat Auswirkung auf alle Knoten innerhalb eines BN, die miteinander in Verbindung stehen. Somit verteilt sich die Wahrscheinlichkeiten gemäß der gesetzten Evidenz neu (Kruse et al., 2011).

In der Abbildung 31 ist ein BN abgebildet, bei dem am Knoten *Defekt am Lager* die Evidenz gesetzt wurde, dass ein Defekt mit 100% eintritt, was durch den roten Balken dargestellt wird. Dadurch hat sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Knoten verändert, die mit diesem in Verbindung stehen. Daraus ergibt sich, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die *Temperatur am Lager* in einem Intervall von  $[0 (-\text{inf}); 30,514]^\circ\text{C}$  liegt, von 94,59% (*Ausgangsnetz ohne gesetzte Evidenzen*) auf 64,97% gesunken ist. So lässt sich sagen, dass, soll-

te die Temperatur am Lager 1 über 30°C steigen, auch die Wahrscheinlichkeit für einen Defekt steigt.

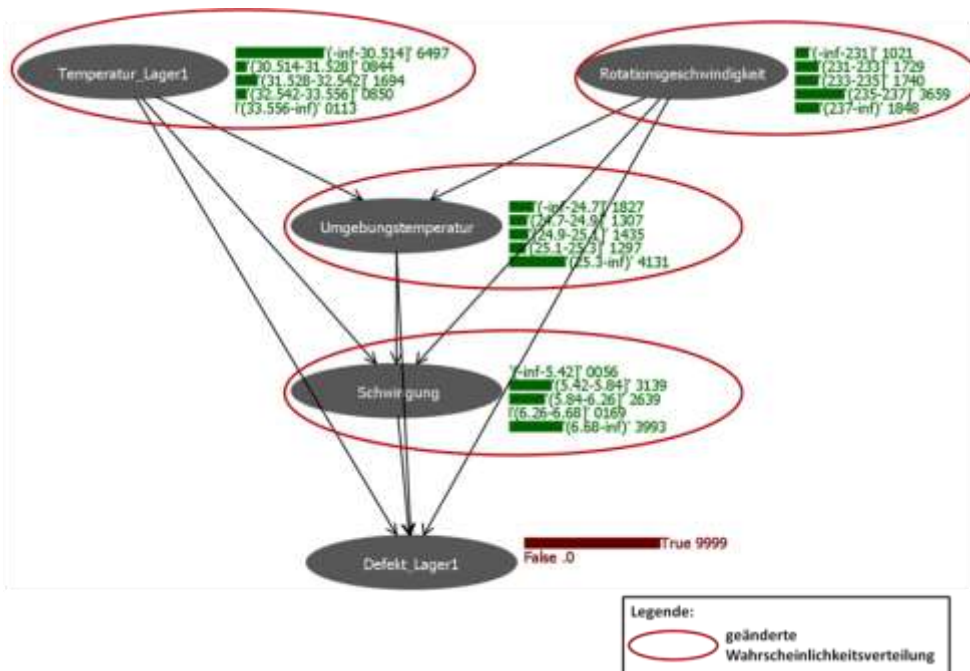


Abbildung 31: BN mit der gesetzten Evidenz „Defekt an Lager 1“

Das kann als Potential für die Verbesserung vom Produktentwickler verwendet werden. Da der Knoten Defekt mit allen anderen Knoten direkt über eine Kante verbunden ist, wirkt sich die gesetzte Evidenz auch auf alle anderen Knoten dieses BN aus.

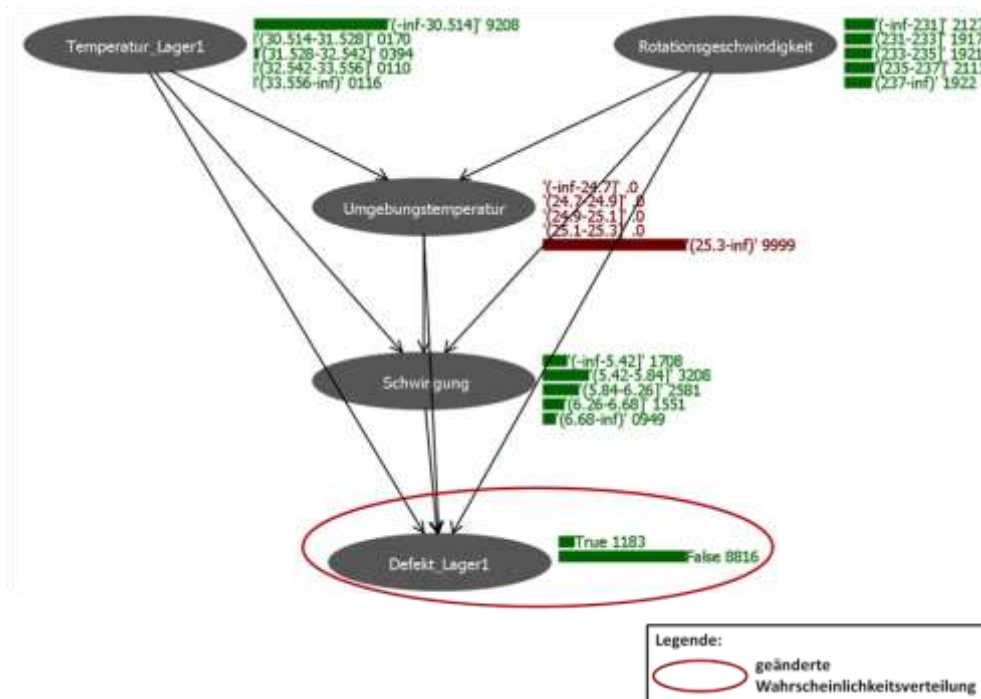


Abbildung 32: BN mit gesetzter Evidenz „Umgebungstemperatur > 25,3°C“

Ein BN kann aber nicht nur zur Feststellung von Fehlerursachen angewandt werden, sondern auch zur Überprüfung der Eignung einer Komponente/ Instanz bei bestimmten Randbedingungen. So werden an eine Pumpe bezogen auf den Standort spezielle Anforderungen gestellt, was z.B. die Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit betrifft. Wenn die Pumpen in einem sehr warmen Klima eingesetzt werden, kann das als Evidenz in dem BN gesetzt und somit simuliert werden. Wie in Abbildung 32 zu sehen, ist eben an dem Knoten *Umgebungstemperatur* die Evidenz gesetzt worden, dass diese über 25 °C Grad liegt. Das hat dazu geführt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Defektes von 6,01 % (BN ohne gesetzte Evidenz) auf 11,83% gestiegen ist. Somit scheint das *Lager* auf den ersten Blick nicht geeignet für ein warmes Klima. Es ist aber erforderlich, diese Diagnose auch bei anderen Pumpen und deren Lagern durchzuführen, um zu evaluieren wo die Wahrscheinlichkeit eines Defektes am geringsten ist.

#### 6.2.4 Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Feedbackdaten

In diesem Kapitel geht es darum, zu untersuchen welche Anzahl von Feedbackdaten erforderlich ist, um ein aussagekräftiges BN zu lernen. Hierzu ist eine Studie durchgeführt worden (Dienst et al., 2010), wo ausgehend von einem optimalen Netz Beispieldaten erzeugt wurden. Aus diesen ist dann wiederum ein BN generiert worden. Sodann ist der Abstand zwischen den Netzen berechnet worden, um festzustellen, wie weit das gelernte Netz von dem optimalen abweicht und ab wann keine Verbesserung bei einer Vergrößerung der Datenbasis erreicht wird. Eine geeignete Technik dazu ist die *Kullback-Leibler-Divergenz*, kurz *KL-Divergenz*, hierbei handelt es sich um ein Abstandsmaß zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Lunze, 1995). In diesem Fall sind das die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des erlernten BN und des optimalen BN. Seien  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{q}$  zwei Verteilungen, typischerweise repräsentiert  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  Beobachtungen oder eine präzise Wahrscheinlichkeitsverteilung, was in diesem Fall die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P_{opt}(\theta)$  des optimalen BN ist, während  $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  ein Modell oder eine Approximation darstellt, in diesem Fall die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P_{gelernt}(\theta)$  des gelernten BN. Die KL-Divergenz wird dann folgendermaßen berechnet:

**Formel 12: Angepasste Kullback-Leibler-Divergenz (Dienst et al., 2010):**

$$KL(P_{opt}, P_{gelernt}) = \sum P_{opt}(\theta) \log \frac{P_{opt}(\theta)}{P_{gelernt}(\theta)}$$

Bei der KL-Divergenz erhält man als Ergebnis einen reellen Wert zwischen 0 und 1. Bei Gleichheit der Wahrscheinlichkeitsverteilungen, also wenn  $\mathbf{P}_{opt} = \mathbf{P}_{gelernt}$ , ist die KL-Divergenz gleich 0 (da  $\log(1) = 0$ ), dann hätte also das aggregierte BN die gleiche Wahrscheinlichkeitsverteilung wie das optimale BN. Deshalb gilt: Je kleiner die KL-Divergenz ist, bzw. je näher der Wert bei 0 liegt, desto mehr stimmt das erzeugte BN mit dem optimalen BN überein (Kuntze, 2007).

Um aus einem gegebenen BN eine beliebige Anzahl von Testfällen zu erzeugen, aus denen dann wieder ein BN gelernt wird, werden Sampling-Verfahren angewandt (Thompson, 2000). Das Sampling ist ein Oberbegriff für eine ganze Reihe von Algorithmen. Im Folgenden werden die fünf Sampling-Verfahren, die im Programmtool GeNIe zur Verfügung stehen, genutzt (Loboda & Voortman, 2012):

---

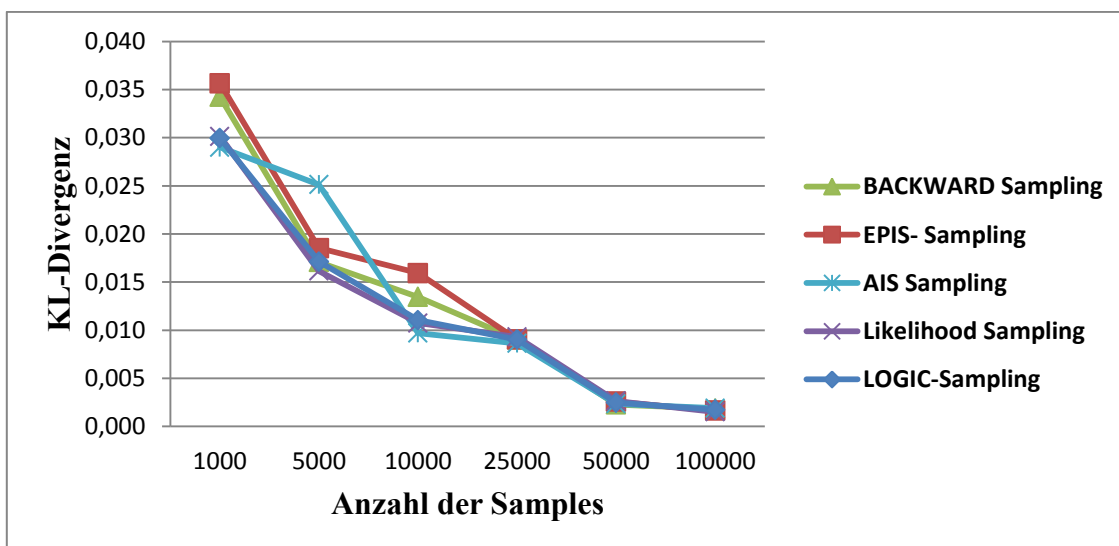
- Der **Estimated-Posterior-Importance-Sampling-Algorithmus** (kurz: EPIS) wurde 2003 erstmals von Yuan & Druzdzel auf BN angewandt (Yuan & Druzdzel, 2003). Der EPIS-Algorithmus berechnet zuerst eine Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle Knoten und deren direkte Nachbarn durch. Anschließend wird das *Importance Sampling* angewandt, um die Schätzung zu verfeinern (Loboda & Voortman, 2012).
- Der **Adaptive-Importance-Sampling-Algorithmus** (kurz: AIS) ist im Jahr 2000 von Cheng & Druzdzel im Kontext des BN angewandt worden (Cheng & Druzdzel, 2000). Ein adaptives Verfahren ist ein iteratives Verfahren, das basierend auf Zwischenergebnissen angepasste verbesserte Ergebnisse produziert. So werden hier mittels eines adaptiven Verfahrens Werte geschätzt, die dann mittels des *Importance Sampling* verbessert werden.
- Der **probabilistic Logic Sampling Algorithmus** stammt aus der Statistik und wurde 1988 erstmals von Max Henrion angewendet, um Bayes'sche Netze zu aktualisieren (Henrion, 1988). Im Wesentlichen basiert der Algorithmus auf dem Forward Sampling. Der konkrete Samplewert einer Variablen wird dann, jeweils in Abhängigkeit der zufälligen Belegung seiner Elternknoten, zufällig aus den Werten seiner CPT ermittelt. Anschließend werden alle Musterdatensätze, die nicht der definierten Evidenzkombination entsprechen, aussortiert. Darauf aufbauend können dann Trainingsdaten für das zu lernende BN erzeugt werden.
- Der **Likelihood-Sampling-Algorithmus** nach Fung & Chang macht den Versuch, die Effizienz von der Wahrscheinlichkeit des Logic-Sampling-Algorithmus zu verbessern, indem die Erzeugung irrelevanter Musterdatensätze ausgeschlossen wird (Fung & Chang, 1989).
- Der **Backward-Sampling-Algorithmus** wurde erstmals von Fung & del Favero 1994 beschrieben (Fung & Favero, 1994). Dabei wird wiederholt ein Knoten ausgewählt, um gemäß seiner bedingten Verteilung einen Wert in Abhängigkeit von den Werten der anderen Knoten zu erzeugen, die Werte der anderen Knoten bleiben dabei unverändert. Der Backward-Sampling-Algorithmus durchläuft das Netz dabei rückwärts. Aus der so entstandenen Folge lässt sich eine Markov-Kette bilden (Loboda & Voortman, 2012).

Tabelle 15: KL-Divergenz der Sampling-Verfahren (Dienst, 2009)

Anzahl der Erzeugten Datensätze	LOGIC-Sampling	EPIS-Sampling	BACKWARD Sampling	Likelihood Sampling	AIS-Sampling
100	0,1108467	0,1098341	0,1958142	0,2099882	0,1254329
1.000	0,0299468	0,0356456	0,0342437	0,0301255	0,0289953
5.000	0,0171346	0,0185293	0,0170797	0,0161554	0,0251337
10.000	0,0110487	0,0159397	0,0134541	0,0107390	0,0097018
25.000	0,0090399	0,0090396	0,0090381	0,0092983	0,0086413
50.000	0,0024825	0,0025745	0,0022891	0,0026563	0,0023455
100.000	0,0017368	0,0016496	0,0018547	0,0015112	0,0019018

Durch den Einsatz der Sampling-Algorithmen wird die Anzahl der Datensätze aus den optimalen BN generiert, dabei variiert die Anzahl der Daten zw. 100 und 100.000. Aus diesen Daten wird jeweils ein BN in WEKA gelernt und mittels der KL-Divergenz wird verglichen, wie nah es dem optimalen BN ist. So erhält man die in der Tabelle 15 aufgeführten Werte zu den jeweiligen Sampling-Algorithmen.

Die aufgetragenen Kurven (vgl. Abbildung 33) zeigen bei allen fünf Sampling-Algorithmen einen bis auf kleine Schwankungen identischen Verlauf: Die KL-Divergenz nimmt mit steigender Anzahl der Musterdatensätze ab und nähert sich ab 50.000 Musterdatensätze dem Wert 0 an (Dienst et al., 2010). Wie bereits oben erwähnt, nähert sich damit die Wahrscheinlichkeitsverteilung des gelernten BN der des optimalen BN an. Das Logic-Sampling und Likelihood-Sampling sind bei dem durchgeführten Test die beiden Algorithmen, die durchschnittlich die besten Ergebnisse liefern. Das sieht man daran, dass die Kurven der beiden Algorithmen unterhalb der anderen Kurven liegen und sie sich stetig ohne Schwankungen nach oben verbessern. Die Kurven der anderen Verfahren verlaufen ähnlich wie die Logic- und Likelihood-Kurven, allerdings sind die KL-Divergenz-Werte etwas schlechter. Ab einer Anzahl von 25.000 Musterdatensätzen sind die Unterschiede zwischen allen fünf Verfahren so gering, dass sie in der gewählten kleinmaßstäbigen Abbildung nicht mehr sichtbar sind. Daraus lässt sich ableiten, dass ab einer Anzahl von 25.000 Musterdatensätzen alle Sampling-Algorithmen gleich gut geeignet sind.



**Abbildung 33: KL-Divergenz bei den verschiedenen Sampling-Verfahren (Dienst, 2009)**

Allgemein lässt sich Schlussfolgern, dass ab einer Anzahl von 50.000 Musterdatensätzen die Kurven nahe 0 sind. Damit ist eine ausreichende Anzahl gegeben, um ein generelles BN zu lernen. Das bedeutet, dass das gelernte BN ist dann genauso gut geeignet wie das optimale BN, um Evidenzen zu setzen und so eine WHAT-IF-Analyse zur Gewinnung von Erkenntnissen für die Entwicklung der nächsten Produktgeneration durchzuführen. Die CPTs, und damit die Wahrscheinlichkeiten, sind zwar nicht identisch, aber die Abweichungen sind so gering, dass die gleichen grundsätzlichen Ergebnisse herauskommen. Die Veränderungen bei der Wahrscheinlichkeitsverteilung liegen in der vierten Nachkommastelle oder darunter. Die KL-Divergenz kann ab einer Anzahl von 50.000 Testdaten kaum noch verringert



werden. Es sind damit ausreichend Daten zur Verfügung, um eine Struktur zu erlernen, die der des optimalen entspricht. Für das FAS bedeutet das, dass eine verhältnismäßig große Datenbasis erforderlich ist, um ein generelles Netz zu lernen. So sind 50.000 Datensätze für das zuvor dargestellt Netz mit 5 Knoten erforderlich. Bei mehr Knoten steigt auch die Anzahl der benötigten Daten. Wenn aber die Grenze erreicht wurde, kann die Qualität kaum durch eine weitere Erhöhung des Datenumfangs gesteigert werden. Wenn man davon ausgeht, dass, wenn einmal täglich Messdaten erfasst werden, pro Jahr nur 365 Datensätze zusammenkommen, ist es von Vorteil, dass nicht einzelnen Instanzen betrachtet werden, sondern Produktgeneration mit  $n$  Instanzen als Datenquellen.

### 6.3 Erweiterungen der Bayes'schen Netze

Aus den gesamten Feedbackdaten einer Maschine kann, wie zuvor gezeigt ein allgemeines BN gelernt werden. Je nachdem, wie viele Messpunkte vorhanden sind, steigt dabei auch die Zahl der Knoten und der CPTS, was dann zu einer komplexen und unübersichtlichen Darstellung führen kann. Ziel ist es aber, ein BN zu erzeugen, das für den Produktentwickler intuitiv verständlich und interpretierbar ist. Auch soll das Wissen wie gezeigt nicht nur angewandt werden, um eine konkrete Produktegeneration zu verbessern, sondern auch Komponenten Produktunabhängig zu verbessern. Durch die Anwendung der Feedbackanalyse können so bei Standardkomponenten Rückschlüsse gezogen werden, wie die Eignung einer bestimmten Dichtung bei hoher Temperatur. Dabei ist es egal, bei welcher Produktgeneration sie verbaut wird. Hierzu müssen die Feedbackdaten nach Aussagekraft den einzelnen Komponenten zugeordnet werden.

Zudem wächst das BN überexponentiell mit der Zahl der Knoten (Ertel, 2013). So gibt es bei 5 Knoten 29.281 Möglichkeiten und bei 6 Knoten etwa  $10^{15}$  Möglichkeiten, die Kanten zu setzen (Melancon et al., 2000) in (Ertel, 2013). Dies kann dazu führen, dass der Lernalgorithmus diesen Umfang nicht mehr bewältigen kann und kein Ergebnis liefert. Aus diesen beiden Gründen entstand die Motivation, Erweiterungen von BN einzusetzen, um die Komplexität zu reduzieren und ein BN mit möglichst wenigen Knoten zu generieren (vgl. Abbildung 34).

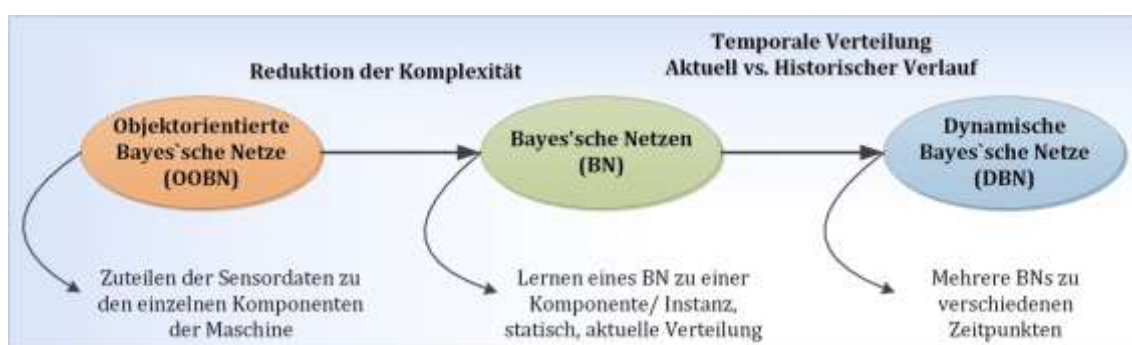


Abbildung 34: Kombination von OOBN, BN und DBN (Dienst et al., 2014)

Eine Maschine besteht aus verschiedenen Komponenten, wie Lager oder Motor. Zu jeder dieser Komponenten können die relevanten Messpunkte zugeordnet werden, was mittels eines **Objekt Orientierten Bayes'schen Netzes (OOBN)** modelliert werden kann. Ein

OoBN ist ein Entscheidungs- oder normales BN, das zusätzlich zu den bereits bekannten Knoten sogenannte *Instanzknoten* besitzt (Johnson, 2009), (Koski & Noble, 2009). Ein Instanzknoten repräsentiert eine Instanz von einem anderen Netzwerk, das in ein bestehendes Netz als Subnetz integriert werden kann (Hugin, 2012). OoBN sind zu verstehen als hierarchische Beschreibung der realen Welt (Susnik et al., 2012). Dabei basieren die OoBN auf den Prinzipien der objektorientierten Programmierung (Molina et al., 2010). Im Kontext der objektorientierten Programmierung würde man einen Instanzknoten als *Klasse* bezeichnen. Wie diese kann eine Instanz wiederum andere Instanzen beinhalten, so dass man mit Hilfe von OoBN zu einer hierarchischen Beschreibung von Produkten kommen kann. So wird nicht zu jeder Maschine aus allen verfügbaren Feedbackdaten ein BN generiert, sondern eine Vorselektion der relevanten Feedbackdaten erfolgt und es ist möglich, komponentenabhängig ein BN zu lernen. Auch bei dem OoBN gibt es CPTs zu den Knoten, wie bei dem BN.

Die Verwendung von OoBN erleichtert einerseits die Modellierung von komplexen Problemstellungen und erhöht andererseits die Wiederverwendbarkeit von Teilkomponenten einmal erstellter Netze. So kann bspw. eine Maschine als komplexes Problem betrachtet werden, da es eine Vielzahl von Daten gibt, die erzeugt und zurückgeführt werden. Der erste Schritt ist, diese Daten zu Informationen zu verdichten. Die Daten sind nicht alle relevant zur Aufdeckung von Schwachstellen, zur Modellierung dieser Abhängigkeiten eignet sich das OoBN. Aus diesen OoBN können sodann verschiedene BN generiert werden.

Dazu ist es notwendig, verschiedene Objekte zu definieren, zu denen verschiedenen Instanzknoten aufgestellt werden können. Zu nennen ist hier das Objekt „*Sensor*“, wo die verschiedenen Sensoren für die Instanzknoten des Objektes stehen. Sodann gibt es noch das Objekt „*Betriebsdaten*“, wo die verschiedenen Feedbackdaten zusammengefasst werden, die während des Betriebs erfasst werden, wie z.B. der Stromverbrauch sowie das Objekt „*Maschine*“ an sich, das sich aus deren Komponenten zusammensetzt. Verbunden sind die Objekte über die „*Defekt*“-Knoten, die zu den Instandhaltungsknoten zählen. Die weiteren Servicedaten werden hier nicht betrachtet, da diese bereits über die statistische Analyse in den Feedbackfluss eingebunden sind.

Aus den Feedbackdaten einer Komponente wird dann das BN gelernt. Bei einem BN handelt es sich um eine statische Methode, die keine temporale Verteilung zeigt. Vielmehr werden die gesamten Daten aggregiert zu einer Datenbasis, woraus dann das BN ohne Bezug auf Zeit gelernt wird. Bei manchen Maschinen ist es aber so, dass sie nicht das ganze Jahr über konstant laufen, sondern ihr Einsatz variiert, was nicht durch das BN abgebildet wird. Dies kann dann zu Fehlern bei der Interpretation des BN führen, hier wäre es interessant, ein dynamisches BN einzusetzen. Ein ***Dynamisches Bayes'sches Netz (DBN)*** ist eine Erweiterung oder auch ein Spezialfall eines BN mit dem Vorteil einer Visualisierung der temporalen Verteilung (Russell & Norvig, 2012). Gerade bei der BHK (vgl. Kapitel 4) ist eine Analyse über die Zeit, wie es mittels des DBN möglich ist, relevant. So kann hier das BN zu verschiedenen Zeitscheiben (z.B. den Jahreszeiten) betrachtet werden, dadurch können feingranulare Rückschlüsse zum Maschineverhalten und Fehlerursachen gezogen werden. Gerade was die Laufzeit angeht, sind bei einer Heizanlage wie der BHKW deutliche Unterschiede über die Zeit (Sommer vs. Winter) zu erwarten.

Der Begriff "dynamisch" meint die Modellierung eines dynamischen Systems, und nicht das sich das Netzwerk mit der Zeit verändert, sondern nur die Verteilungen der jeweiligen Zufallsvariablen (Murphy, 2002), (Russell & Norvig, 2012). Bei einem DBN ist es bei der Umsetzung möglich, nur bestimmte Knoten bzw. Kanten dynamisch zu setzen (Loboda & Voortman, 2012). So wird auch eine Vereinfachung des Lernaufwands erreicht, da die graphische Struktur konstant ist, muss „nur“ die Wahrscheinlichkeitsverteilung neu gelernt werden. Es kann aber das Problem auftreten, das das DBN bei zu vielen Zeitscheiben unübersichtlich wird. Dabei ist zu beachten, dass die Komplexität steigt, je mehr Zeitscheiben gesetzt werden und je kürzer die Abstände zwischen diesen sind (Shi & You, 2007). Die Nützlichkeit von DBN ist die Integration von Wahrscheinlichkeitsverteilungen von mehr als einem BN. D.h., in einem DBN besteht die Möglichkeit, zeitliche Verteilungen zu modellieren, die zwischen diskreten Zeitpunkten  $t$  (mit  $0 \leq t \leq T$ ) auftreten. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, mittels einer *What-If* Analyse z.B. die Rotationsgeschwindigkeit im Zeitpunkt  $t=1$  und  $t=2$  zu vergleichen, was in einem BN, was eine statische Methode ist und somit nur eine Zeitinstanz repräsentiert, nicht möglich ist. Im Allgemeinen kann jeder Zeitinstanz bzw. Zeitscheibe eines DBN eine beliebige Anzahl von Variablen zugeordnet werden. Eine Zeitinstanz ist eine Momentaufnahme, die den Zustand einer Maschine zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt (Russell & Norvig, 2012).

Ein DBN ist definiert als ein Satz von BN, wobei  $B_1$  die erste Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(Z_1)$  definiert und  $B_T$  steht für die letzte Zeitscheibe. Murphy beschreibt das DBN als zwei-Instanz temporales BN, das  $P(Z_t, Z_{t-1})$  definiert mittels eines DAG (Murphy, 2002). Das drückt aus, dass das BN der Zeitscheibe  $Z_t$  abhängig ist von dem BN der vorangegangenen Zeitscheibe  $Z_{t-1}$ , was auch durch die Kanten dargestellt wird. Hierzu gibt es die folgende Formel zu DBN (Murphy, 2002):

**Formel 13: Dynamisches Bayes'sches Netz**

$$P(Z_t|Z_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(Z_t^i|Pa(Z_t^i))$$

wobei  $Z_t^i$  der  $i$ . Knoten zum Zeitpunkt  $t$  ist und  $Pa(Z_t^i)$  sind die Elternknoten von  $Z_t^i$  im Graph. Dabei besteht ein DBN aus einer variablen endlichen Anzahl von Zeitscheiben (Brandherm, 2006), (Russell & Norvig, 2012), (Prinzie & Van den Poel, 2011).

Bei einem DBN wird unterschieden zw. *dynamischen* und *temporalen Knoten* (Brandherm, 2006). *Temporalen Knoten* sind abhängig von der gewählten Zeitscheibe. Visuell ist das in dem DBN anhand der Kanten, die auf den Knoten selbst verweisen, und deren Beschriftung wie  $t=1$ ,  $t=2$ , etc. zu sehen. Diese werden dann *temporale Kanten* genannt (Brandherm, 2006). In DBN dürfen Kanten nicht über eine Zeitscheibe hinaus verlaufen, daher werden neue Zeitscheiben durch temporale Kanten mit der letzten Zeitscheibe des alten Netzes verbunden (Brandherm, 2006). Bei einem temporalen Knoten wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung für jede Zeitscheibe gesetzt, dies wären dann die Inputknoten. Bei einem *dynamischen Knoten* ändert sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung anhand der berechneten globalen Verteilung (CPTs) automatisch. Diese wird aus den Ursprungs-BN genommen. Wenn sich nun an den temporalen Knoten in einer Zeitscheibe  $t$  die Wahrscheinlichkeitsverteilungen ändert, hat das wie bei dem Setzen einer

---

Evidenz auch Einfluss auf alle assoziierten Knoten und deren CPT, nur das hier keine 100 % gesetzt werden, sondern es eher um marginale Veränderungen geht. Ein BN kann also zu einem DBN erweitert werden, sodass die graphische Struktur aus den Ursprungs-BN beibehalten wird, die Wahrscheinlichkeitsverteilungen aber dynamisch zu  $n$  Zeitpunkten dargestellt werden. So ist der Produktentwickler in der Lage, auch die temporale Verteilung zu berücksichtigen.

Für die Umsetzung heißt das, dass zur Modellierung des OOBBN zuerst das zu verbessernde Produkt, dessen Komponenten und die dazu erfassten Feedbackdaten analysiert werden müssen.

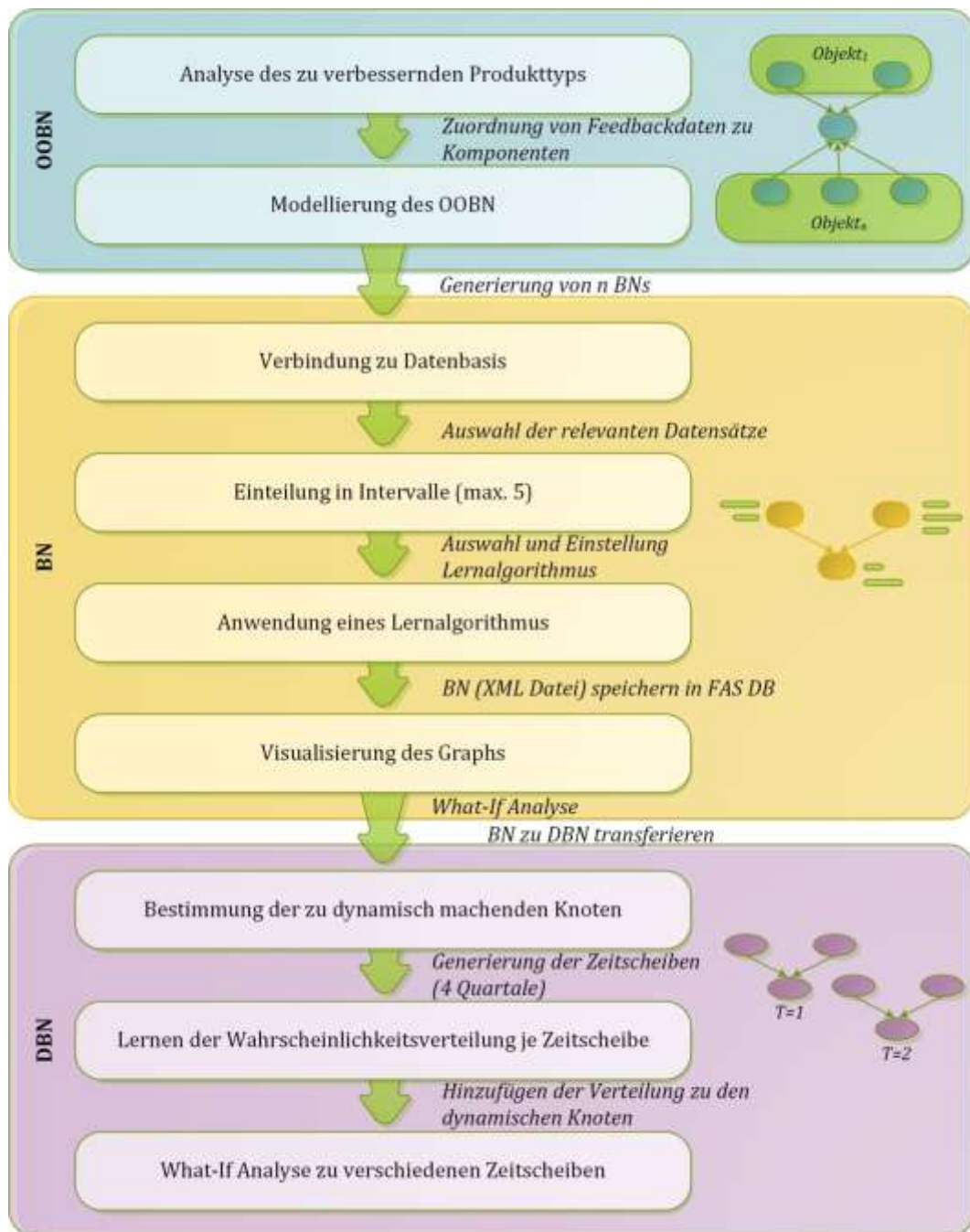


Abbildung 35: Prozessschritte zur Umsetzung der Kombination von BNs (Dienst et al., 2014)

Dazu müssen die Objekte (wie Maschinen) mit dazugehörigen Knoten (wie Komponenten) identifiziert werden und die Instanzknoten, die keinem Objekt zugeordnet werden können, um die Objekte miteinander zu verbinden (z.B. Fehler). Modelliert wird das OOBN dann, indem die aufgedeckten Abhängigkeiten von Daten zu den Komponenten/Bauteilen mittels Objekten und Netzen in einen Graph dargestellt werden. Dieses allgemeine OOBN liefert somit die Basis zur Umsetzung eines OOBN zu einer bestimmten Maschine, wie in der folgenden Abbildung zu den BHKW modelliert. Zur Umsetzung des OOBN ist auf das Tool „HUGIN EXPERT A/S“ (Hugin, 2012) zurückgegriffen worden. HUGIN EXPERT A/S besteht seit 1989 und ist der führende Anbieter von Software für fortschrittliche Entscheidungsunterstützung auf Basis von komplexen statistische Modellen wie BN (Hugin, 2012).

Bei dem BHKW gibt es die drei Objekte, wobei die Ausprägungen, d.h. die Instanzknoten, dann spezifisch des BHKW sind siehe Abbildung 36, vgl. dazu die Feedbackdaten in Kapitel 4.2.3. Verbunden sind die Objekte über die Defekte, die an dem BHKW auftreten können. Anhand dieser Darstellung lässt sich die Zuordnung des Defekts zu den dazu gehörigen Feedbackdaten ablesen. So ist in rot markiert die Auswahl eines Defektes und der Daten dargestellt, aus denen im nächsten Schritt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des BN gelernt wird. Hier ist direkt die Reduktion der Daten zu sehen, aus denen dieses nun gelernt wird, sodass die spätere Darstellung dann nicht so komplex ist.

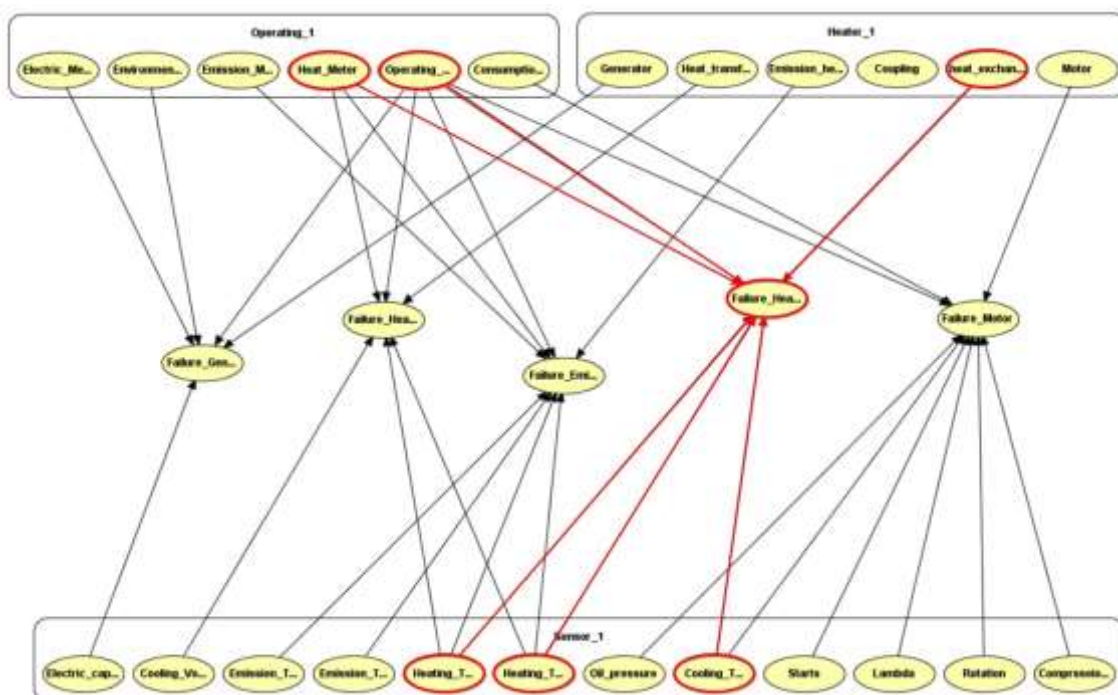


Abbildung 36: OOBN des BHKW

In dem BHK werden zur Übertragung der Abwärme aus Motor und Abgas die Komponenten Abgaswärme- und Kühlwasserwärmeübertrager eingesetzt (Viessmann, 2009). In dem OOBN ist der Defekt an dem Abgaswärmeübertrager ausgewählt worden. Dieser überträgt die Abgasabwärme des Motors in den Heizwasserkreislauf (Viessmann, 2009). So wird aus den ausgewählten Daten, von dem Objekt *Betriebsdaten* („Betriebsstunden“ und „Wär-

memengenzähler“), und dem Objekt *Sensor* („Kühlwassertemperatur“, „Heizwassertemperatur vor Modul“ und „Heizwassertemperatur nach Modul“) zu dem Fehler an der Komponente Ursprungs-BN gelernt.

Zur Erzeugung des BN gibt es verschiedene Ansätze, in dem Beispiel bei den hydraulischen Strömungsmaschinen wird, da die Datenbasis ausreichend groß ist, sowohl die Struktur als auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung aus den Trainingsdaten generiert, wohingegen die graphische Struktur des BHK manuell erzeugt und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsstruktur aus den zur Verfügung stehenden Daten gelernt wird. Das geschieht aufgrund der Tatsache, dass zur Umsetzung eines aussagekräftigen BN nicht genügend Daten zur Verfügung stehen.

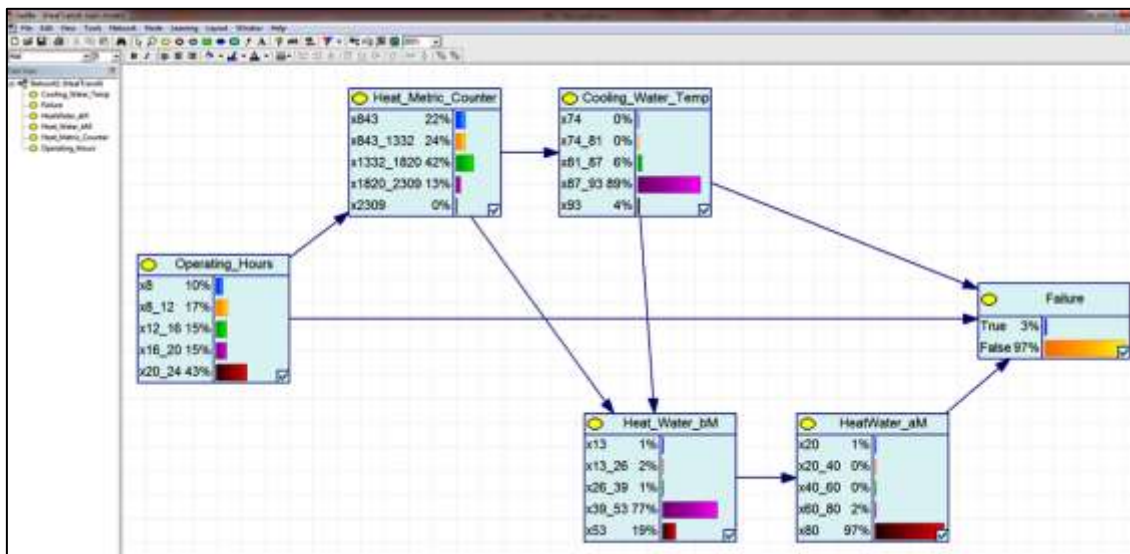


Abbildung 37: BN der Komponente „Abgaswärmeübertrager“ (Dienst et al., 2014)

Das mittels WEKA gelernte BN ist hier mittels des Tools „Graphical Network Interface“ (kurz GeNie) dargestellt worden. GeNie ist eine nutzerfreundliche Entwicklungsumgebung für graphische entscheidungstheoretische Modelle (Loboda & Voortman, 2012). Hier ist eine Kombination der beiden Tools notwendig, da GeNie nicht das maschinelle Lernen von BN aus Daten in den Umfang, in dem es in WEKA möglich ist, unterstützt. Im Gegensatz dazu unterstützt das WEKA nicht die Erzeugung von DBN, GeNie aber schon.

In der Abbildung 38 sind Evidenzen gesetzt worden: *Betriebsstunden < 8 Stunden/Tag* und *die Kühlwassertemperatur liegt zw. 81-87°C*. Hier ändert sich im Vergleich zu den Tool WEKA nicht die Farbe an den Knoten, wo eine Evidenz gesetzt wurde, sondern es wird repräsentiert durch die 100%, die vor dem entsprechenden Balken steht. Bei der GUI sind somit Vorteile bei der intuitiven Interpretierbarkeit der Ergebnisse bei WEKA zu erkennen. Das Setzen der Evidenzen hat zur Folge, dass die Wahrscheinlichkeit eines Defektes um 5% steigt, im Vergleich zum BN ohne gesetzte Evidenzen. Es haben sich aber auch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen an den verbundenen Knoten verändert, wie z.B. das aufgrund der niedrigen Betriebsstunden am Tag auch die erzeugte Wärme, die anhand des Wärmemengenzählers gemessen wird, sinkt. Bei dem BHKW ist die Betriebszeit nicht im-

mer gleich, so ist diese im Winter, wenn es kalt ist, hoch (24 h/Tag), wohingegen sie im Sommer niedrig ist, dazu wird nun ein DBN umgesetzt.

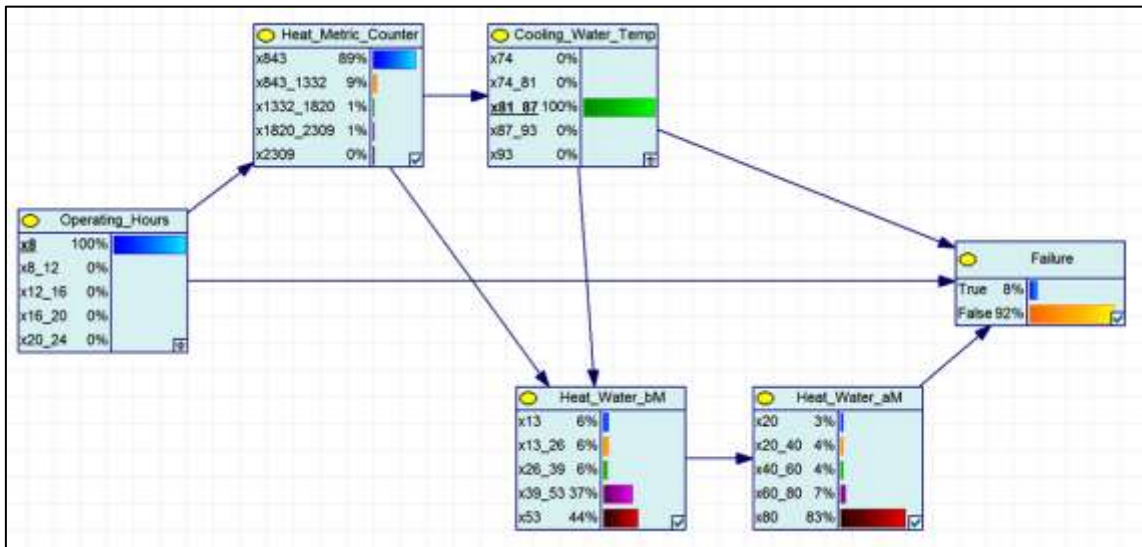


Abbildung 38: BN mit gesetzten Evidenzen (Dienst et al., 2014)

Um aus dem BN in GeNIe ein DBN zu machen, wird zu Anfang die Anzahl der Zeitscheiben gesetzt, was hier „vier“ für die Anzahl der Jahreszeiten sind. Dann sind die Knoten des BN zu betrachten und nach temporär und dynamisch zu unterscheiden und bei den temporären Knoten dementsprechend die temporalen Kanten für jede Zeitscheibe zu setzen (Dienst et al., 2010). Hier ist der Input- oder Elternknoten *Betriebsstunden* der, der als temporärer Knoten gesetzt wird, da diese Wahrscheinlichkeitsverteilung wie zuvor beschrieben abhängig von dem betrachteten Quartal ist, wie in der folgenden Abbildung zu sehen.

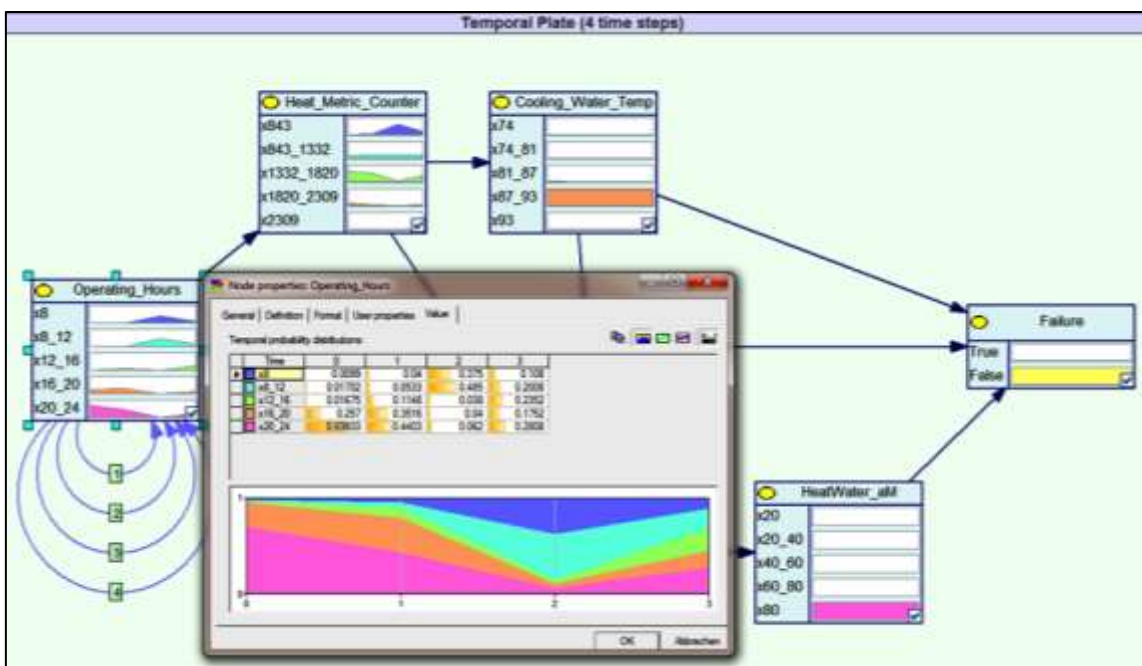


Abbildung 39: DBN

Dabei steht Temporal Plate (oben in der Mitte) für die Zeitscheiben. An dem Ersten Knoten (Betriebsdaten) sind vier temporale Kanten zu sehen, wobei die Zahl an der Kante für die Zeitscheibe  $t=1, t=2, \dots$  steht. Die CPT des Knoten ist in dem Fenster im Vordergrund zu sehen, dabei ist auch deutlich anhand der Farbverteilung zu sehen, dass diese sich über die Zeit verändert. Die Ausprägung bei den anderen dynamischen Knoten ist unterschiedlich stark, so ist bei dem Knoten *Wärmemengenzähler* wie erwartet eine CPT zu sehen, die sich auch stark über die Zeit ändert, wohingegen die Ausprägung bei den anderen Knoten nicht so stark zu sehen ist. Bei dem Netz in Quartal 1 ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 3% und die steigt in Quartal 2 auf 4%, ohne das eine Evidenz gesetzt wurde.

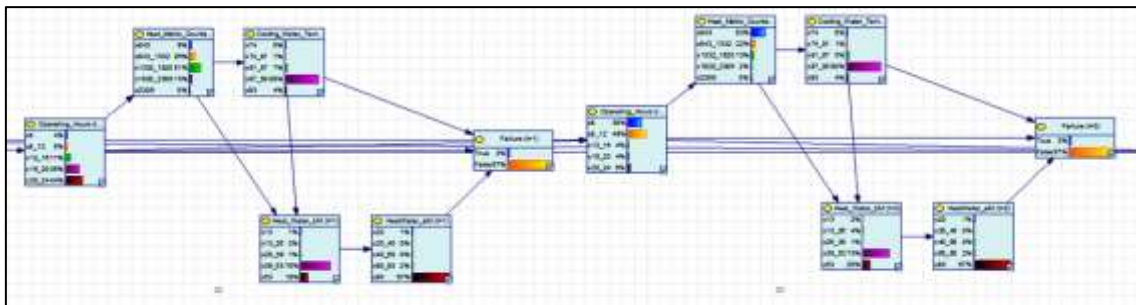


Abbildung 40: Ausschnitt des DBN zu Quartal 1+2

Es ist auch möglich, die Darstellung zu ändern, sodass zu jeder Zeitscheibe ( $Z_T$ ) ein BN gezeigt wird, verbunden mit den BN der folgenden Zeitscheibe ( $Z_{T-1}$ ). Hierbei geht allerdings die Übersichtlichkeit der Darstellung verloren, wie in Abbildung 40 zu sehen ist. Es ist aber auch möglich, in einem DBN eine oder mehrere Evidenzen zu setzen, diese können je Zeitscheibe individuell gewählt werden (Dienst et al., 2010).

## 6.4 Entscheidungsunterstützung bei der Verbesserung

Das FAS stellt bereits jetzt dem Produktentwickler Analyse- und Diagnosemethoden zur Verfügung, mit denen er den bisherigen Betrieb verschiedener Produktinstanzen oder Produktgenerationen untersuchen kann. Hier steht die Identifikation von Schwachstellen im Vordergrund. Es wird noch keine Unterstützung der Verbesserungskonstruktion vorgenommen, z.B. in Form von aktiven Handlungsempfehlungen oder der Vorhersage eines Maschinenverhaltens beim Austausch einer Komponente, die eine Schwachstelle darstellt. Die Wirksamkeit geplanter Maßnahmen zur Schwachstellenbeseitigung ist meist nicht vorhersehbar, so dass nach dem Trial-and-Error-Prinzip gearbeitet wird. Hiermit verbunden sind oft hohe Folgekosten, mangelnde Qualität und eine niedrige Kundenzufriedenheit. Methoden zur Entscheidungsunterstützung stellen hier Möglichkeiten dar, eine Schwachstellenbeseitigung systematisch und mit geringem Zeit- und Kostenaufwand durchzuführen.

Es werden nun Methoden entwickelt, die den Produktentwickler zielgerichtet bei der Entscheidung von Maßnahmen während der Produktverbesserung unterstützen. Hier rückt die *Produktgeneration<sub>n+1</sub>* in den Vordergrund. Während bisher die Frage „Was kann verbessert werden?“ von Interesse war, steht jetzt die Frage „Wie kann die *Produktgenerati-*



*on<sub>n+1</sub>* verbessert werden?“ im Zentrum. Hierzu wird ein Entscheidungsunterstützung Modul für das FAS entwickelt.

Allgemein wird ein Entscheidungsprozess ausgelöst durch zwei verschiedene Wahrnehmungen: Entweder der Entscheidungsträger erkennt, dass mindestens zwei Alternativen existieren, oder er nimmt eine Differenz zwischen dem aktuellen und einem gewünschten Zustand wahr (Goeken, 2006), (Bamberg et al., 2012). Die Entscheidung ist definiert als Wahl zwischen mehreren Handlungsalternativen, die zur Erreichung eines Zieles zur Verfügung stehen (Wessler, 2012). Bei der Produktverbesserung ist mehr als eine Lösungsmöglichkeit vorhanden und es ist eine Vielzahl an Kriterien für die Entscheidung zu beachten. Die verschiedenen Kriterien können dabei höchst unterschiedlich und sogar divergent sein, so sind z. B. technische, wirtschaftliche, qualitäts- oder zeitbezogene Faktoren zu beachten. Aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Kriterien ist der Produktentwickler oft mit der Auswahl der Lösung überfordert. Ursachen für Probleme bei der Entscheidungsfindung sind u.a. unvollständige Informationen, Zufallseinflüsse, Subjektivität des Entscheidungsträgers, unsichere Zukunft etc. (Lassmann, 2006). Hier setzt die **Entscheidungstheorie** an. Es gibt in der Entscheidungstheorie eine Unterscheidung in zwei Teilgebiete (Dillon et al., 2005), (Laux et al., 2012):

- Die **deskriptive** Entscheidungstheorie untersucht empirisch die Frage, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden, und erklärt, warum sie gerade so und nicht anders zustande kommen. Ihr Ziel ist es, empirisch gehaltvolle Hypothesen über das Verhalten von Individuen und Gruppen im Entscheidungsprozess zu finden, mit deren Hilfe bei Kenntnis der jeweiligen konkreten Entscheidungssituation Entscheidungen prognostiziert bzw. gesteuert werden können.
- Die **normative oder präskriptive** Entscheidungstheorie (auch bekannt als Entscheidungslogik) beschreibt nicht Entscheidungsprozesse, sondern dient dazu, die Entscheidung selbst zu unterstützen, um diese „rational“ zu treffen. Es werden Vorschläge für die Lösung von Entscheidungsproblemen gegeben. Hiermit wird eine Antwort gegeben auf die Frage, was ein Entscheider in unterschiedlichen Entscheidungssituationen tun soll.

In der vorliegenden Arbeit wird die präskriptive Entscheidungstheorie verfolgt, da es das Ziel ist, dem Produktentwickler bei Entscheidungen durch die Empfehlung von Handlungsalternativen zu assistieren und nicht, seine getroffenen Entscheidungen nachzuverfolgen.

Jedem präskriptiven Entscheidungsprozess liegt das Grundmodell der Entscheidungstheorie zugrunde vgl. (Goeckede, 2004), (Laux et al., 2012). In Anlehnung an das Grundmodell und aufbauend auf vorhandenen Konzepten zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung (Lindemann, 2009) ist das Entscheidungsunterstützung - Modul (vgl. Abbildung 41) in das FAS integriert worden. Die Interpretation der aktuellen Situation ist durch die zuvor umgesetzten Analyse- und Diagnosemethoden umgesetzt worden. Hier lassen sich die Komponenten identifizieren, bei denen eine Verbesserung notwendig ist, bzw. die Ursachen für Fehler waren.

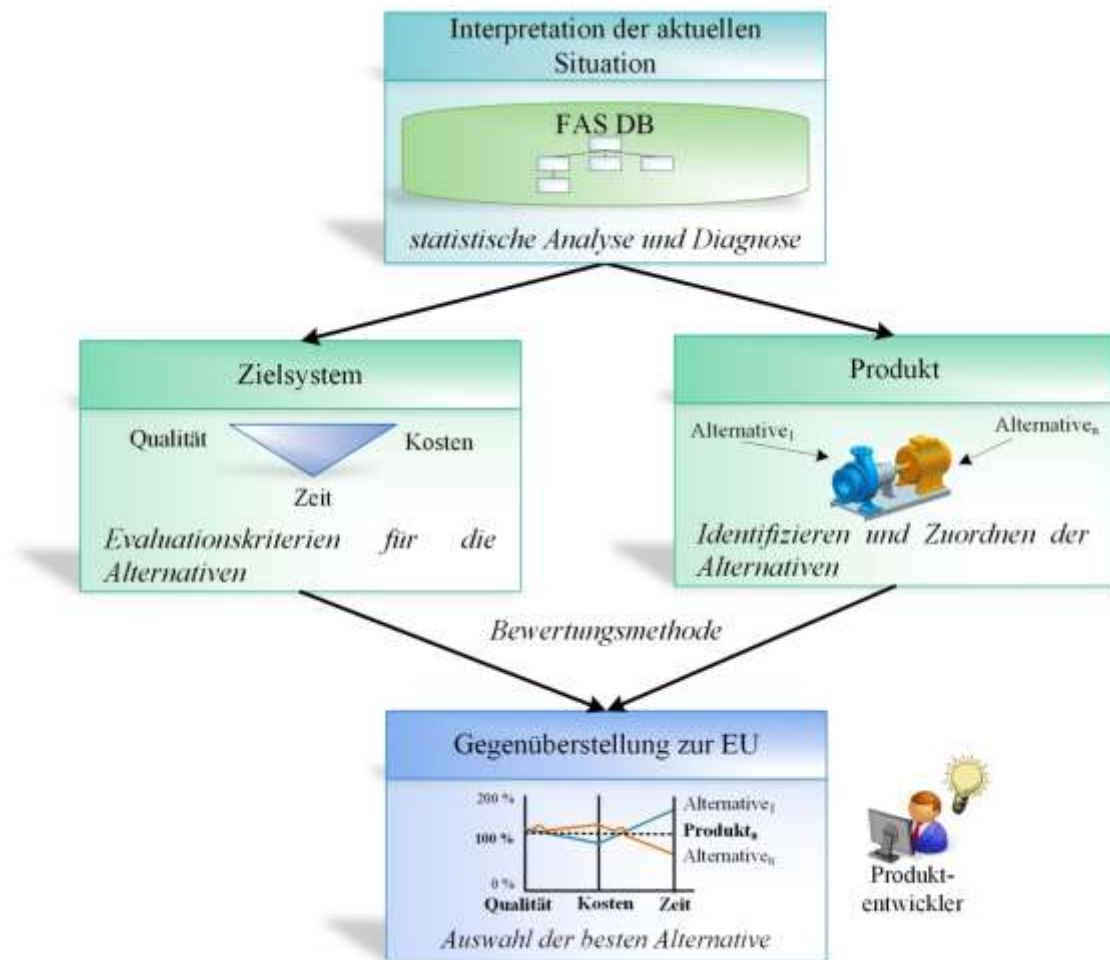


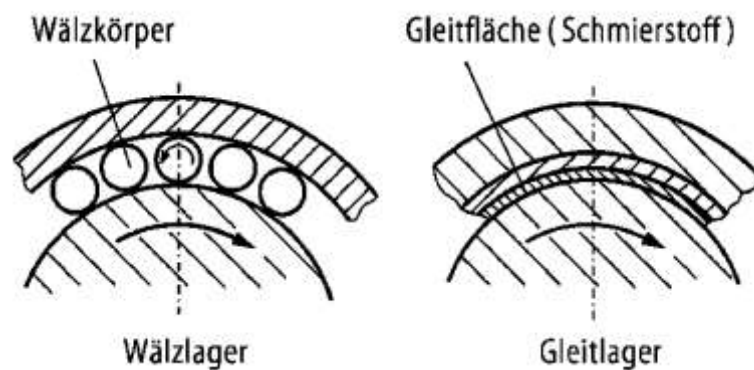
Abbildung 41: Konzept des Entscheidungsprozess (Dienst et al., 2014)

Nun sind für die zu verbessernde Komponente Alternativen zu identifizieren und Ziele zum Evaluieren dieser aufzustellen. Hierzu ist ein Zielsystem zu entwickeln, dass die Ziele aus der Produktentwicklung widerspiegelt. Diese bestehen aus den drei Oberkategorien Kosten, Qualität und Zeit (Lindemann, 2009). Zur Aufstellung der Alternativen ist es erforderlich, die FAS - DB zu erweitern, nämlich um die Beziehung, das eine Maschine, eine Komponente bzw. ein Bauteil eine „Alternative von“ einem entsprechenden Objekt ist.

Verbunden werden die Alternativen und das Zielsystem durch die Anwendung einer Bewertungsmethode aus dem Bereich der Entscheidungstheorie (Breiing & Knosala, 1997). Hier gibt es verschiedene Verfahren, die es ermöglichen, die Alternativen in Bezug auf die verschiedenen Kriterien zu evaluieren, sodass als Ergebnis des Entscheidungsunterstützung Modul dem Produktentwickler eine Visualisierung der besten Alternativen zur Verfügung steht, einschließlich des Faktors, wie gut sie die Kriterien erfüllt haben.

Die Umsetzung wird exemplarisch an den hydraulische Strömungsmaschinen gezeigt, die Verbesserungsalternativen sind dabei die Wahl zwischen verschiedenen Lagertypen und deren Charakteristika, wobei Lagerung die fertig gestaltete Baugruppe bezeichnet (Wittel et al., 2011). „Lager haben die Aufgabe, relativ zueinander bewegliche, insbesondere drehbewegliche Teile in Maschinen und Geräten abzustützen und zu führen und die wirkenden äußeren Kräfte (quer, längs und/oder schräg zur Bewegungsachse) aufzunehmen und auf

*Fundamente, Gehäuse oder ähnliche Bauteile zu übertragen (Funktion).*“ (Wittel et al., 2011).



**Abbildung 42: Wälz- und Gleitlager (Grote & Feldhusen, 2012)**

Es gibt unterschiedliche Lagertypen, zwei der bekanntesten Beispiele (Wälz- und Gleitlager) sind in Abbildung 42 dargestellt. Der Unterschied liegt in der Zwischenschaltung. Wo bei Wälzlagerern sogenannte *Wälzkörper* zum Einsatz kommen, wird bei den Gleitlagern ein Schmierstoff verwendet (Grote & Feldhusen, 2012). *Wittel* klassifiziert Lager nach folgenden Eigenschaften (Wittel et al., 2011):

- *Wirkungsprinzip*: Gleitlager, Wälzlager und Magnetlager (hier wird die Zwischenschaltung durch die magnetische Kraft erreicht),  
*Richtung der Lagerkraft*: Axial- vs. Radialkraft,  
*Funktion*: Fest-, Stütz- und Loslager,  
*Bauform*: Steh-, Augen-, Flansch-, Gelenk- und Einbaulager und  
*Montagemöglichkeit*: geteilte und ungeteilte Lager

Hierrunter können eine Vielzahl von Lagern zugeordnet werden, siehe dazu (Wittel et al., 2011), (Grote & Feldhusen, 2012). Hier werden fünf Lageralternativen betrachtet, die u.a. bei der hier betrachteten Strömungsmaschine, der Radialkreiselpumpe, zum Einsatz kommen (Abramovici et al., 2013):

- Kugellager
- Rillenkugellager
- Zylinderlager
- Nadellager

Zu diesen vier Lageralternativen wird nun eine Entscheidungsmatrix aufgestellt, um die Verbesserungsalternativen zu bewerten (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Paarweiser Vergleich der Lageralternativen (Abramovici et al., 2013)

Zielkriterien	Anforderung	Gewichtung	Lager 1		Lager 2		Lager 3		Lager 4	
			Kugel	Rillen	Zylinder	Nadel				
<b>Zeit</b>			<i>E</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>E</i>	<i>G</i>
MTTR (Min)	<1 Stunde	18	3	54	3	54	3	54	4	72
MTBF (Max)	>30 Tage	14	5	70	3	42	3	42	2	28
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Kosten</b>										
Installationskosten	<200 €	6	4	24	4	24	4	24	5	30
Entsorgungskosten	<50 €	2	5	10	5	10	4	8	1	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Qualität</b>										
Nutzbarkeit	>90%	8	1	8	2	16	4	32	2	16
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Bewertung</b>	Summe		325		298		270		308	

Dabei ist der allgemeine Aufbau einer Entscheidungsmatrix gegeben, bei der die Zielkriterien ins Verhältnis zu den Anforderungen gesetzt werden (Eisenführer et al., 2010). Innerhalb der Matrix werden diese zusammengeführt und bewertet. Die Kriterien, die erreicht werden sollen, bestimmen sich aus den Anforderungen des Lastenhefts an das zu verbessernde Produkt. So ergeben sich die zu erreichenden Grenzwerte, wie z.B. dass die MTTR < 1 Stunde sein soll. Dabei wird unterschieden, ob es sich um Kriterien handelt, die zur Optimierung maximiert werden sollen, wie die Betriebszeit ohne Ausfälle, und die, die minimiert werden sollen, wie die Instandhaltungskosten. So kann anhand der Feedbackdaten bestimmt werden, ob und wie gut sie erreicht wurden oder nicht. Dafür steht *E* als Erfüllungsgrad im Vergleich zur aktuell in der Nutzung befindlichen Alternative. Hierbei werden die folgenden Punkte vergeben:

- 1 bis 2 - wenn die Alternative schlechter als die in der Nutzung befindliche ist,
- 3 - wenn sie genauso gut ist und
- 4 bis 5 - wenn sie besser ist.

Danach folgt eine Gewichtung der Zielkriterien. Manche Ziele müssen erreicht werden, da der Kunde ansonsten das Produkt nicht kaufen würde oder er später unzufrieden damit wäre. Daneben gibt es Ziele, die als „Nice to have“ einzustufen sind. Die Punkte, die in diesem Beispiel vergeben werden, liegen zw. 0 und 20, werden multipliziert mit dem Erfüllungsgrad jeder Lageralternative und ergeben so die Spalte *G* für den gewichteten Erfüllungsgrad. Die Werte der Spalte *G* werden dann zu jeder Alternative aufaddiert und ergeben die Bewertungssumme, aus der die Rangfolge abgelesen werden kann. So steht auf Rang 1 das Kugellager mit der größten Punktesumme mit 325, dies wäre dann die beste Alternative. Danach folgen auf Rang 2 das Nadellager mit 308 Punkten und dann die Weiteren. Die beschriebene Matrix wird nun computerbasiert umgesetzt, zu Beginn wird daher das Zielsystem aufgestellt.

Es gibt auch noch Ereignisse, die vom Produktentwickler nicht beeinflusst werden können, oder die nicht bekannt sind. Diese wirken aber durchaus auf die Konsequenzen der Wahl

einer Option (Lassmann, 2006). Sie machen die Entscheidungssituation unsicher. Die Unsicherheitssituation lässt sich gliedern in (Eisenführer et al., 2010):

- **Entscheidung unter Sicherheit:** Die eintretende Situation ist bekannt, jeder Handlungsalternative kann ein eindeutiges Ergebnis zugeordnet werden (*Deterministisches Entscheidungsmodell*).
- **Entscheidung unter Unsicherheit:** Es ist nicht mit Sicherheit bekannt, welche Umweltsituation  $s_j$  eintritt, man unterscheidet dabei weiter in:
  - **Entscheidung unter Risiko:** Die Wahrscheinlichkeit für die möglicherweise eintretenden Umweltsituationen ist bekannt (*Stochastisches Entscheidungsmodell*).
  - **Entscheidung unter Ungewissheit:** Man kennt zwar die möglicherweise eintretenden Umweltsituationen, allerdings nicht deren Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Da das FAS nur eine limitierte Sicht auf das Entscheidungsproblem gibt, bei der nicht alle Optionen bekannt sind, kann es der Entscheidung unter Unsicherheit zugeordnet werden. Das ist auch bei den dargestellten Ergebnissen des Entscheidungsunterstützung - Moduls zu berücksichtigen. Es kann so auch sein, dass eine Neuentwicklung einer Komponente, die bisher noch nicht in der Nutzung war, eine besser Alternative darstellt.

#### 6.4.1 Zielsetzung aus der Produktentwicklung

Die Gesamtheit aller Ziele zu einer Entscheidungssituation wird Zielsystem genannt und muss folgende allgemeinen Anforderungen erfüllen (Eisenführer et al., 2010):

**Vollständigkeit:** Alle wesentlichen Aspekte der Konsequenzen für den Produktentwickler müssen berücksichtigt werden.

**Redundanzfreiheit:** Es sollte nicht mehrere Ziele geben, die das gleiche bedeuten bzw. die sich überschneiden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass „gleiche“ Ziele unterschiedlich gewichtet werden.

**Messbarkeit:** Die Ziele müssen messbar gemacht werden, sodass das, was dem Produktentwickler wirklich wichtig ist, auch dementsprechend gemessen wird.

**Eindeutigkeit:** Der Bereich der Unschärfe soll bei der Messung möglichst gering sein.

**Präferenzunabhängigkeit:** Der Produktentwickler soll seine Präferenzen bezüglich der Teilmengen der Zielvariablen unabhängig voneinander aufstellen. Das ist wichtig, da es die Aufstellung einer additiven multiattributiven Wertfunktion erlaubt, d.h. es ist möglich, die Gesamtwerte der erfüllten Ziele von Alternativen zu addieren, um diese sodann vergleichen zu können.

**Einfachheit:** Je weniger Ziele ein Zielsystem hat, desto weniger aufwendig ist das weitere Verfahren der Präferenzstrukturierung und Bewertung der Alternativen.

Diese Anforderungen bilden die Rahmenbedingungen für die Aufstellung des Zielsystems. Eine Produktentwicklung ist dann erfolgreich, wenn die vorher definierten Unternehmens- und Entwicklungsziele erreicht werden. Ziele werden durch quantifizierbare Kriterien repräsentiert (Wessler, 2012).



**Abbildung 43: Darstellung des Zielsystems**

Die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität sind konkurrierende Größen, die sich gegenseitig beeinflussen (Abbildung 43). Trotz der Anforderungen an den Produktentwickler, die Produktverbesserung mit geringem Zeit- und Kostenaufwand durchzuführen, muss die Qualität der erarbeiteten Lösung hoch sein. Der Einsatz von Methoden zur Entscheidungsunterstützung hilft dabei, diese Anforderungen zu erfüllen, indem dem Produktentwickler Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen und entscheidungsrelevante Daten bereitgestellt werden.

Zu den Zielen lassen sich Unterziele aufstellen, um diese messbar zu machen, die Kriterien. Dabei gibt es die Verfahren Top-Down (von oben nach unten) oder Bottom-Up (von unten nach oben) (Eisenführer et al., 2010). Hier wird ein kombiniertes Anwenden beider Verfahren gewählt. Durch die Vorgabe der drei Oberziele ist das Verfahren Top-Down gekennzeichnet, wo nun alle möglichen Ziele unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an das Zielsystem aufgelistet werden.

Dabei sind die Kennzahlen zu Zeit und Kosten bereits bei der statischen Analyse ermittelt worden (siehe Kapitel 6.1.1), die auch quantifizierbaren Kriterien für das Zielsystem darstellen. Zusätzlich dazu sind noch Kennzahlen, die die Qualität betreffen, zu bestimmen. Allgemein lässt sich die geforderte Qualität von Kunden bei Maschinen beschrieben als die „Abwesenheit von Fehlern bzw. Abweichungen“ und „der maximale Produktnutzen“ (Holzbaur, 2007). Bezüglich des Produktnutzens wird zwischen Primär- und Sekundärnutzen unterschieden (Holzbaur, 2007):

- Primärnutzen oder Grundnutzen eines Produkts ist die eigentliche Funktion, die ein Produkt zu erfüllen hat.
- Sekundärnutzen oder Zusatznutzen eines Produkts sind alle Effekte, die zwar gewünscht, aber nicht Primärnutzen sind, z.B. Prestige.

Gerade bei der Qualität kann es zu Überschneidungen mit den anderen beiden Zielen kommen. So sind qualitätsbezogene Kriterien zur „Abwesenheit von Fehlern bzw. Abweichungen“, die sich aus den Feedbackdaten berechnen lassen:

- Die *Ausfallhäufigkeit* (Kennzahl, mittels der die Zuverlässigkeit einer Maschine bestimmt wird)
- Eng verbunden mit der *Verfügbarkeit* (Gesamtnutzzeit im Verhältnis zur Ausfallzeit, als Prozentsatz der Verfügbarkeit der Maschine für die Produktnutzung. Da hierbei zeitbezogene Feedbackdaten herangezogen werden, könnte dies Kriterium auch der Zeit zugeordnet werden.)

Der maximale Produktnutzen ist gekennzeichnet durch:

- die *Produktivität* (Anzahl der produzierten Güter. Bei der Pumpe handelt es sich um die Fördermenge und bei dem BHK können hier die Wärme und der erzeugte Strom über einen bestimmten Zeitintervall (Monat, Quartal) genannt werden.)
- und die *Umweltfreundlichkeit* (gemessen anhand des Verbrauchs der eingesetzten Inputstoffe, wie Strom oder Gas. Hierbei handelt es sich auch um eine Anzahlbetrachtung, die nach Möglichkeit minimiert werden soll, was auch als Nebeneffekt eine Reduktion der Kosten in der Nutzung bedeutet.)

**Tabelle 17: Zielkriterien zu Zeit, Kosten und Qualität**

Zeit	Min/ Max	Kosten	Min/ Max	Qualität	Min/ Max
Mean Time To Repair (MTTR)	Min	Gesamte Kosten für Ersatzteile	Min	Verfügbarkeit (wird in Prozent angegeben, berechnet wird die Ausfallzeit im Durchschnitt zur Betriebszeit)	Max
Mean Time To Repair Start (MTTRS)	Min	Gesamte Kosten des Servicemitarbeiters	Min	Produktivität (Anzahl der produzierten, geförderten, etc. Güter)	Max
Mean Repair Time (MRT)	Min	Gesamte Kosten der Servicemaßnahmen über die gesamte Lebensdauer	Min	Umweltfreundlichkeit (Verbrauch, wie Strom oder Gas)	Min
Stillstandzeiten (TBR)	Min	Entsorgungskosten	Min	Zuverlässigkeit (Ausfallhäufigkeit)	Min
Fehlerzeiten (TTR)	Min	Installationskosten	Min		
Störungsfreie Nutzungsdauer	Max	Betriebskosten (Kosten die während der Nutzung anfallen, unabhängig von den Instandhaltungskosten, keine Personalkosten)	Min		
Nutzungszeit ( $T_{Nutz}$ )	Max				

Die Kriterien (vgl. Tabelle 17) sind nun danach einzuteilen, ob es sich um Ziele handelt, die minimiert bzw. maximiert werden sollen. So handelt es sich bei Kosten tendenziell um Ziele, die minimiert werden sollen, da der Kunde ein möglichst „günstiges“ Gut erwerben möchte, wohingegen die Qualität dem komplementär maximiert werden soll. In der nachfolgenden Tabelle ist diese Zuordnung dargestellt.

Hierbei sind aber noch keine Gewichte der Kriterien vergeben worden. Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Ziele gleich wichtig für Kunden oder Produktentwickler sind. Es gibt die Möglichkeit, eine fixe Hierarchie der Ziele aufzustellen, die dann für jede Entscheidungssituation gilt. Das umzusetzende System würde diese dann als Basis nehmen. Der Nachteil hierbei ist allerdings, dass nicht pauschal bestimmt werden kann, welchen Kunden welche Ziele wichtiger sind als andere. So kann bei *Kunde A* die Qualität wichtiger sein als die Kosten, bei *Kunde B* ist aber gerade das Gegenteil der Fall.

Daher wird keine Hierarchie aufgebaut, vielmehr soll es später möglich sein, dass der Produktentwickler manuell bewertet, welche Ziele in der aktuellen Entscheidungssituation hoch gewichtet werden und welche niedrig. Ebenso soll manuell ausgewählt werden, welche Kriterien überhaupt berücksichtigt werden, da es sein kann, dass manche Kriterien für bestimmte Kunden nicht relevant sind und von daher auch nicht in die Bewertung mit einberechnet werden. Somit steht das Zielsystem zur Bewertung der Verbesserungsalternativen.

#### 6.4.2 Verbesserungsalternativen

Bei der Aufstellung von Alternativen gibt es allgemeine Anforderungen aus der Entscheidungstheorie, die zu beachten sind, damit eine rationale Entscheidung vom Produktentwickler getroffen werden kann, da es irrational ist, Entscheidungen auf Prämissen zu gründen, die sich widersprechen (Eisenführer et al., 2010). Im Folgenden sind die wichtigsten Anforderungen dargestellt (Eisenführer et al., 2010):

- **Zukunftsorientierung:** Die Wahl zwischen Alternativen sollte nur von zukünftigen Situationen, d.h. von Konsequenzen, abhängen.
- **Transitivität:** Wenn der Entscheidungsträger eine Alternative *A* gegenüber *B* wählt und *B* gegenüber *C* wählt, dann muss daraus folgen das er auch *A* gegenüber *C* wählt.
- **Invarianz:** Egal wie die Auswirkungen von Alternativen dargestellt werden, der Entscheidungsträger sollte immer die gleiche Alternative als die beste wahrnehmen und wählen.
- **Unabhängigkeit** von irrelevanten Alternativen: Ob der Entscheidungsträger *A* gegenüber *B* wählt, darf nicht abhängig davon sein, ob es eine dritte Alternative gibt.

Die Alternativen zur Entscheidung sind entweder bekannt, wie die Auswahl einer Komponente anhand eines Produktkatalogs, und liegen damit als explizites Wissen vor, oder sie müssen erst identifiziert werden, da es sich u.a. um implizites Wissen des Produktentwicklers handelt.

Um das implizite Wissen explizit und damit kommunizierbar bzw. anwendbar zu machen, gibt es verschiedene Verfahren, von Interviews (*Mensch zu Mensch Interaktion*) oder digitalen Fragebögen (*Mensch zu Computer Interaktion*) bis hin zu komplexen Methoden wie Cased-Based Reasoning (CBR) (*Computer zu Computer Interaktion*). CBR basiert dabei auf der Annahme, dass bei ähnlichen Problemen auch ähnliche Lösungen gefunden werden (Beierle & Kern-Isberner, 2008), (Beißel, 2011). Wenn dieses Lösungswissen abgelegt und durch eine Suche, die auf Ähnlichkeit basiert, wiedergefunden wird, kann der Problemlösungsprozess beschleunigt werden. Das CBR könnte dazu herangezogen werden, das Produktentwicklungswissen zu verwalten und zu verteilen. Hierbei ist ein Ablagesystem zu entwerfen, wo die gefundenen, umgesetzten Verbesserungslösungen abgelegt werden. Sodann ist ein Ähnlichkeitsverfahren umzusetzen, das abhängig von relevanten Komponenten ähnliche Lösungen findet. Das ist allerdings zu komplex für diese Arbeit und ergibt somit eine interessante Erweiterung für die Zukunft.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das bekannte, explizite Wissen genutzt. In der Produktentwicklung (in PDM oder PLM Systemen) wird eine Produktstruktur erstellt und verwaltet. Hier wird, zugeordnet zu einer Produktgeneration, abgelegt, welche Komponenten ver-

---



baut wurden und welche erstellt wurden. Basierend darauf werden Produktkataloge von den Herstellern erstellt. Diese nutzt der Produktentwickler zur Auswahl einer geeigneten Komponente für eine Produktgeneration. Hier finden sich u.a. technische Informationen (wie Förderleistung, Wirkungsgrad, etc.) und Informationen zu Schnittstellen (wie Maße), zusätzlich dazu werden Eigenschaften hinterlegt (Vor- und Nachteile wie „*leise im Betrieb*“). Hersteller bieten diese Kataloge an und sie liegen als Druckversion oder digital in Datenbanken vor, wie beispielsweise bei:

- Sawa Pumpen (Sawa, 2013),
- Speck-Pumpen (Speck-Pumpen, 2013)
- Online Katalog von WILO (Wilo, 2013), etc.

Hier werden zu Baureihen (als Oberklasse) die verschiedenen Instanzen mit den speziellen Ausprägungen (Produktliste) verwaltet und liegen bei den Herstellern in DB vor. Wenn diese Struktur in die FAS - DB übertragen wird, lässt sich damit die Beziehung „ist Alternative von“ abbilden. Dies ist die Quelle für die automatische Bewertung der Komponenten anhand der Feedbackdaten. Durch die Analyse der aktuellen Situation mittels der *Kennzahlen* Betrachtung und der *Diagnose* weiß der Produktentwickler, welche Anforderungen nicht erfüllt wurden und welche Komponenten Schwachstellen aufweisen und verbessert werden müssen. Um diese Alternativen nun nach den Kriterien zu bewerten, wird ein Verfahren aus der Entscheidungstheorie angewandt.

#### 6.4.3 Multikriterielle Entscheidungsverfahren

Bei Entscheidungen wird zwischen verschiedenen Entscheidungstypen unterschieden. Diese sind a) die Auswahlentscheidung der optimalen Lösung, b) Rangordnungsentscheidungen, wobei die verschiedenen Alternativen in Ordnung von wichtig bis unwichtig gebracht werden, und c) die Klassifikation in gute und schlechte Alternativen (Belton & Stewart, 2002). Bei einer Auswahlentscheidung liegt eine „Ideallösung“ zum Vergleich vor und ist relativ einfach zu realisieren. Wenn keine Ideallösung vorliegt, werden Verfahren aus der Entscheidungstheorie zur Unterstützung dieses Prozesses eingesetzt (Wenger, 2010). Bei der Rangordnung werden die verschiedenen Alternativen nach der Zielerfüllung gewichtet und die Alternative mit dem maximalen Wert steht an erster Stelle der Rangordnung. Im Kontext dieser Arbeit wird die aktuell umgesetzte Produktalternative als Vergleichswert genommen. Es sind hierzu die fünf Alternativen zu bestimmen, die in der Rangordnung am besten abschneiden. So kann der Produktentwickler evaluieren, ob es eine bessere Lösung gibt als die aktuelle. In der Entscheidungstheorie gibt es eine Vielzahl an Methoden, die zur Entscheidungsunterstützung eingesetzte werden können.

Zur Einschränkung der Methoden sind die Rahmenbedingung der Entscheidung zu betrachten, es werden verschiedene Zielsetzungen aus Kosten, Zeit und Qualität als Basis genommen. Wenn bei einer Entscheidungsfindung mehrere Zielkriterien zu berücksichtigen sind, spricht man von einer *multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (Multi Criteria Decision Making – MCDM)*. MCDM Verfahren werden unterschieden in (Hwang & Yoon, 1981), (Zimmermann & Gutsche, 1991), (Götze, 2008), (Walther, 2010):

- *Multi Attribut Decision Making (MADM)*, in denen eine Auswahl vorbestimmter Handlungsalternative erfolgt, und

- *Multi Objective Decision Making (MODM)*, in denen die Handlungsalternativen durch Berechnung bestimmt werden.




In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den MADM Verfahren, da hier die Verbesserungsalternativen anhand der Zielkriterien gegenübergestellt werden und nicht wie bei MODM die Berechnung der Alternativen. Eine Klassifikation der möglichen Verfahren bezieht sich auf die *Art der verfügbaren und verwendeten Informationen* vgl. die folgende Tabelle nach (Hwang & Yoon, 1981), (Stewart, 1992), (Zimmermann & Gutsche, 1991), (Figueira et al., 2005), (Götze, 2008), (Walther, 2010). Hierbei handelt es sich um die Darstellung der bekanntesten Methoden zu MADM. Da es sich um ein Thema handelt, zu dem schon viel Forschung betrieben wurde, gibt es noch weitere Methoden wie SAW, ANP, etc. bzw. Ausprägungen dieser vgl. dazu u.a. (Helmis & Hollmann, 2009), (Eisenführer et al., 2010), die hier aber nicht weiter betrachtet werden.



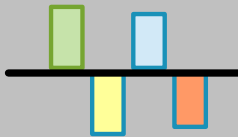
Die MADM werden nach (Walther, 2010) unterteilt in Verfahren, zu denen Informationen zu Attributen für die Bewertung vorhanden sind, und solche, in denen diese Informationen fehlen. Bei der vorliegenden Arbeit sind Informationen vorhanden, sodass ein Verfahren aus dieser Unterklasse gewählt wird, hier wird zwischen den folgenden Begrifflichkeiten unterscheiden (Götze, 2008):

- *Anspruchsniveau* – Zielwerte sind Grenzwerte (Max/ Min), sie dürfen nicht über- bzw. unterschritten werden. Dies dient dem Ziel, zwischen akzeptablen und nicht akzeptablen Alternativen zu trennen und auch der Ermittlung der Zielbedeutung anhand des Anspruchs.
- *Ordinale Informationen* – der Entscheidungsträger hat zusätzliche Informationen zu den Attributen, die auf einem ordinalen Skalenniveau gemessen werden können.
- *Kardinale Informationen* – Hierbei werden die Attribute in Kriterien ausgedrückt und deren Bedeutung durch eine Gewichtung.
- *Substitutionsraten* – durch diese werden hier die Zielkriterien festgelegt, wobei im Fokus die Wechselwirkung zwischen den Attributen liegt. Wenn beispielsweise der Entscheidungsträger bei einem Attribut auf Einheiten verzichtet, wie viele Einheiten werden dafür bei einem anderen aufaddiert, bei gleichbleibendem Gesamtnutzen.

In dem EU - Modul werden die Feedbackdaten in Kriterien ausgedrückt, die dann zur Bewertung der Alternativen gewichtet werden, was den *kardinalen Informationen* entspricht, daher werden Verfahren aus dieser Kategorie eingesetzt. Nun ist eine geeignete Methode auszuwählen, mittels der ein paarweiser Vergleich der Lageralternativen (Tabelle 16) realisiert werden kann. Dazu wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Verfahren mit der Zielsetzung und dem Vorgehen zur Umsetzung gegeben (Tabelle 18).

Tabelle 18: Bewertungsverfahren

Name	Zielsetzung	Vorgehen
<p><b>AHP - Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1980)</b></p> 	<p>AHP wird eingesetzt zur Strukturierung und Analyse komplexer Entscheidungsprobleme. Die Zielsetzung hierbei ist, das gesamte Entscheidungsproblem in eine Vielzahl von kleinen Elementen aufzuteilen. Sodann wird zur Bewertung ein paarweiser Vergleich zur Aufstellung einer hierarchischen Abhängigkeit der Zielkriterien durchgeführt (Götze, 2008).</p>	<p>In AHP werden die folgenden Schritte durchlaufen (Zimmermann &amp; Gutsche, 1991):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bilden einer Hierarchie (Aufteilen in Ober- und Unterziele)</li> </ul> <p>Paarweise bewerten von Entscheidungsträger nach 9 - Punkte - Skala von Saaty (1 - gleiche Bedeutung,..., 9 - Ziel A dominiert B absolut)</p> <p>Ermittlung eines Gewichtungsvektors          Konsistenzprüfung der Ergebnisse          Bewertung der Alternative</p>
<p><b>Nutzwertanalyse (Zangemeister, 1976)</b></p>  	<p>Die Nutzwertanalyse hat das Ziel, die Alternativen bei Entscheidungsproblemen gemäß den Präferenzen des Entscheidungsträgers zu ordnen (Götze, 2008). Hierbei wird ein komplettes Zielsystem aufgestellt, wo dann der Entscheidungsträger die Ziele pauschal bewertet. Der Nachteil dabei ist, das die Ziele nicht mit den anderen Zielen ins Verhältnis gesetzt werden wie z.B. bei AHP.</p>	<p>Vorgehen bei Nutzwertanalyse (Blohm et al., 2006), (Götze, 2008):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bestimmung der Zielkriterien</li> <li>2. Bestimmung der Gewichte durch Entscheidungsträger</li> <li>3. Teilnutzenbestimmung - Für den Erfüllungsgrad wird ein Teilnutzwert vergeben</li> <li>4. Nutzwertermittlung - Der Teilnutzwert für jede Alternative wird unter der Einbeziehung der Gewichte der Kriterien zu einem Gesamtnutzwert zusammengefasst.</li> <li>5. Beurteilung der Vorteilhaftigkeit:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenn der Nutzerwert besser als der Grenzwert ist, ist er <b>absolut</b> vorteilhaft.</li> <li>• Wenn der Nutzwert größer ist als andere Nutzwerte, ist er <b>relativ</b> vorteilhaft.</li> </ul> </li> </ol>
<p><b>TOPSIS - Technique for order preference by similarity to ideal solution (Hwang &amp; Yoon, 1981)</b></p>	<p>TOPSIS arbeitet auf einem anderen Prinzip, hierbei wird die „beste“ Alternative bestimmt, indem von der positiv-idealen Lösung die kürzeste Distanz und von der negativ-idealen Lösung die weiteste berechnet wird (Biesenbach, 2007). Dabei werden die Ziele</p>	<p>Vorgehen bei TOPSIS nach (Biesenbach, 2007):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berechnung normalisierte Zielerreichungsmatrix (mittels euklidischer Norm)</li> <li>2. Berechnung gewichteter normalisierter Zielerreichungsmatrix</li> <li>3. Berechnung der positiv-idealen und negativ-idealen Lösung: Ableitung zweier erstellter Alternativen, eine stellt dabei die beste Kombination aller Kriterien dar, die andere die</li> </ol>

	<p>in zu minimierende und maximierende eingeteilt. Der Vorteil ist, dass die Distanz anhand der Kriterien automatisch berechnet wird.</p>	<p>schlechteste.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Berechnung des Abstandswerts: Dazu wird der euklidische Abstand bestimmt, den die Alternativen zur besten und schlechtesten Alternative haben.</li> <li>5. Berechnung der relativen Nähe zu positiv-idealer Lösung: Der Abstand dient somit als Mittel der Vergleichbarkeit von Alternativen.</li> <li>6. Reihenfolgebildung der Alternativen</li> </ol>
<p><b>PROMETHEE - Preference Ranking Method for Enrichment Evaluations</b> (Brans)</p> 	<p>Ausgangsbasis für PROMETHEE ist eine vollständige Entscheidungstabelle, in der die Ausprägungen der Kriterien sämtlicher Alternativen erfasst sind (Götze, 2008). Hierbei werden die Relativen Stärken gegenüber den relativen Schwächen gestellt, mit dem Ziel, eine Rangfolge aller Alternativen zu bilden, daher handelt es sich um ein sogenanntes Outranking - Verfahren. Ziel ist es nicht, die beste Alternative zu identifizieren, sondern „einige“ gute.</p>	<p>Das PROMETHEE-Verfahren sieht folgende Schritte vor (Blohm et al., 2006), (Götze, 2008):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bestimmung der Zielkriterien</li> <li>2. Auswahl verallgemeinerter Kriterien und Präferenzfunktionen, die für jede Alternative bestimmt werden, wobei die Intensität der Dominanz berücksichtigt wird durch eine <i>Präferenzmatrix</i>.</li> <li>3. Bestimmung der Outranking - Relation, die jeweils ein Alternativenpaar auf Basis aller Kriterien einander gegenüberstellt.</li> <li>4. Auswertung der Outranking-Relationen. Hierbei werden sowohl die positiven und negativen Kriterien berücksichtigt. Die relative Vorteilhaftigkeit ergibt sich aus:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. dem größten positiven Wert</li> <li>b. dem kleinsten negativen Wert</li> </ol> </li> </ol>
<p><b>ELECTRE - Elimination et Choice Translation Reality</b> (Roy, Bouyssou 1993)</p> 	<p>Bei <i>ELECTRE</i> handelt es sich ebenso wie bei PROMETHEE um ein Outranking - Verfahren, hier um ein relationsbasiertes Verfahren. Es wird ein paarweiser Vergleich der Alternativen durchgeführt. Dabei wird die Dominanz der Alternativen untereinander mittels einer <i>Konkordanzanalyse</i> bestimmt (Zimmermann &amp; Gutsche, 1991).</p>	<p>Das Vorgehen bei <i>ELECTRE</i> ist wie folgt (Zimmermann &amp; Gutsche, 1991):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berechnung der normierten Zielerreichungsmatrix</li> <li>2. Gewichtung der Zielkriterien durch Entscheidungsträger</li> <li>3. Bestimmung der Konkordanz- und Diskordanzmenge.</li> <li>4. Erstellung einer Konkordanz-/ Diskordanzmatrix</li> <li>5. Bestimmung des Verhältnisses zwischen Konkordanz &amp; Diskordanz.</li> <li>6. Bestimmung der Outranking - Relation.</li> <li>7. Auswertung der Outranking - Relationen.</li> </ol>

Wie sich in der Kurzbeschreibung der bekanntesten Methoden zeigt, werden diese für unterschiedliche Entscheidungstypen eingesetzt. Es gibt von daher nicht die beste oder schlechteste Methode, sondern jede hat Punkte, die für oder gegen diese Methode sprechen. Für das Entscheidungsunterstützung - Modul des FAS wird keine Hierarchie der Zielkriterien aufgebaut werden, da diese bei jeder zu treffenden Entscheidung bzgl. der Auswahl einer Verbesserungsalternative dynamisch anpassbar sein sollen. Das führt zum Ausschluss von AHP.

Bei den Outranking - Verfahren PROMETHEE und ELECTRE ist das Hauptziel, alle Alternativen zu ordnen, von der besten bis zur schlechtesten Alternative. Hierbei werden die positiven und negativen Zielausprägungen berücksichtigt, was im Kontext der Arbeit erreicht werden soll. Allerdings wird hier eine statische Liste der Alternativen bestimmt. Das Problem hierbei ist, dass die aktuelle Lösung nicht als Vergleichswert mit einbezogen wird. Bei den Verfahren wird zudem davon ausgegangen, dass die Präferenzen zu den Kriterien nicht bekannt sind und ermittelt werden müssen. Diese Informationen liegen dem Produkterwickler allerdings vor, bzw. er kann diese Informationen von den Kunden erhalten und in einem Lastenheft ablegen. Somit können die Outranking - Verfahren auch ausgeschlossen werden.

Bei der Nutzwertanalyse und TOPSIS werden Alternativen je nach Zielerfüllung in eine Rangordnung gebracht. Bei TOPSIS ist der Vorteil die Berechnung der normalisierten Entscheidungsmatrix. Da die Feedbackdaten in unterschiedlichen Formaten vorliegen, müssen sie normalisiert werden, um sie vergleichbar zu machen. Bei der Nutzwertanalyse wird hierzu ein Nutzwert vergeben. Bei TOPSIS wird von den aktuellen Lösungen her ein best- und worst- Case berechnet, anhand dessen dann die Alternativen bewertet werden. Das hat den Vorteil, dass das System beliebig um weitere Alternativen erweiterbar ist. Wenn sich die Feedbackdaten ändern, werden automatisch anhand der normalisierten Werte die Vergleichslösungen berechnet. Das ist ein Vorteil, der für TOPSIS spricht, da gerade bei der Produktvielfalt die Feedbackdaten und eben auch die Grenzwerte, wann und in welchem Umfang ein Kriterium erfüllt wurde, stark variieren. Bei der Berechnung des best- und worst- Case kann zudem die aktuelle Lösung immer als Vergleichswert mit einbezogen werden. Daher wird das Entscheidungsunterstützung - Modul auf Basis von TOPSIS umgesetzt.

#### **6.4.4 Realisierung des Entscheidungsunterstützung - Moduls**

Zur besseren Verständlichkeit der Umsetzung, wird in diesem Abschnitt beispielhaft das Vorgehen mittels TOPSIS aufgezeigt.

##### **6.4.4.1 Vorgehensschritte von TOPSIS**

Als Beispiel wird hierzu wird auch die Auswahl einer Lageralternative herangezogen, an der die Vorgehensschritte nach Biesenbach dargestellt werden (Biesenbach, 2007).

##### **1. Berechnung der normalisierten Zielerreichungsmatrix (mittels euklidischer Norm)**

Zur Umsetzung von TOPSIS ist es zu Anfang erforderlich, eine Entscheidungsmatrix ( $E$ ) aufzustellen, wo die Ausprägungen der Kriterien ( $C_j$  mit  $j = 1, \dots, m$ ) zu den Alternativen

---

( $A_i$  mit  $i = 1, \dots, n$ ) zugeordnet werden. Diese sieht standardmäßig wie folgt aus (Hwang & Yoon, 1981):

$$E = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ A_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1j} & \dots & e_{1m} \\ A_2 & e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2j} & \dots & e_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_i & e_{i1} & e_{i2} & \dots & e_{ij} & \dots & e_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & e_{n1} & e_{n2} & \dots & e_{nj} & \dots & e_{nm} \end{matrix}$$

mit  $e_{ij} \in \mathbb{R} \forall i = 1, \dots, n \forall j = 1, \dots, m$

Für die exemplarische Entscheidungsmatrix werden nicht alle zuvor erstellt Kriterien berücksichtigt, sondern nur ausgewählte zu jeder Oberkategorie. Bei der Matrix stehen in den Zeilen die Zielkriterien und in den Spalten die Lageralternativen. Bei den Kriterien ist wichtig, ob diese zu minimieren oder zu maximieren sind, dafür steht das Min bzw. Max in der Matrix.

**Tabelle 19: Entscheidungsmatrix**

		Alternativen					Euklidische Distanz
		Min/Max	Lager 1 Kugel	Lager 2 Rillen	Lager 3 Zylinder	Lager 4 Nadel	
Zielkriterien	<b>Zeit</b>						
	MTTR (in Minuten)	Min	83	115	61	53	163
	MTBF (in Tagen)	Max	60	45	46	35	95
	<b>Kosten</b>						
	Installationskosten (in €)	Min	225	150	175	250	408
	Entsorgungskosten (in €)	Min	45	25	38	26	69
	<b>Qualität</b>						
	Verfügbarkeit (in Tagen)	Max	90	115	85	96	194

Zu den Zielkriterien werden die Durchschnittswerte der Feedbackdaten berechnet und in der dazugehörigen Zeile zu jeder Alternative eingetragen. Hierbei tritt nun das Problem auf, dass diese nicht in einheitlichen Maßen erfasst werden, sondern z.B. die kostenbasierten in € und die zeitbasierten in Minuten. Das Ziel des ersten Schrittes der Methode ist nun, diese Werte zu normalisieren und somit vergleichbar zu machen. Dazu wird die Euklidische Distanz (ED) verwendet (Biesenbach, 2007).

**Formel 14: Euklidische Distanz (ED) bzw. Abstand nach (Biesenbach, 2007):**

$$e(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Jeder Wert in der Spalte der Kriterien wird durch die ED geteilt, hierfür steht die folgenden Formeln nach (Biesenbach, 2007):

**Formel 15: Normalisierung der Entscheidungsmatrix, wenn  $e_{ij}$  ungleich 0**

$$\forall d_{ij} \neq 0: r_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n e_{ij}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad \forall j = 1, \dots, m$$

**Formel 16: Normalisierung der Entscheidungsmatrix, wenn  $e_{ij}$  gleich 0**

$$\forall d_{ij} = 0: r_{ij} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Nach Anwendung der Formel ergibt sich die folgende normalisierte Matrix:

**Tabelle 20: normierte Entscheidungsmatrix**

		Alternativen				
		Min/ Max	Lager 1 <i>Kugel</i>	Lager 2 <i>Rillen</i>	Lager 3 <i>Zylinder</i>	Lager 4 <i>Nadel</i>
<b>Zielkriterien</b>	<b>Zeit</b>					
	MTTR (in Minuten)	Min	0,51	0,70	0,37	0,33
	MTBF (in Tagen)	Max	0,63	0,47	0,48	0,37
	<b>Kosten</b>					
	Installationskosten (in €)	Min	0,55	0,37	0,43	0,61
	Entsorgungskosten (in €)	Min	0,65	0,36	0,55	0,38
	<b>Qualität</b>					
	Verfügbarkeit (in Tagen)	Max	0,46	0,59	0,44	0,49

Das Ergebnis sind Werte, die in einem Intervall von [0; 1] liegen, unabhängig davon, in welcher Einheit sie vorher erfasst wurden. Die Ergebnisse können überprüft werden, in dem nochmals die ED berechnet wird, das Ergebnis muss dann 1 sein. Diese Matrix ist die Basis für den nächsten Schritt, in dem die Kriterien gewichtet werden.

## 2. Berechnung gewichtete normalisierte Zielerreichungsmatrix

Die Kriterien haben nicht alle dieselbe Wichtigkeit, daher ist es möglich und nötig, Gewichte zu vergeben. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, der Entscheidungsträger kann sie bei jedem Entscheidungsprozess manuell vergeben oder es wird, wie bei AHP, eine Hierarchie der Kriterien aufgebaut. Diese Hierarchie wird, wenn sie dann einmal aufgebaut wurde bei jeder Entscheidung verwendet. Bei dem Entscheidungsunterstützung Modul wird die erste Möglichkeit angewandt und die Gewichte werden durch den Produktentwickler bei jeder zu treffenden Entscheidung vergeben. Hierzu werden Werte von 0,01 (unwichtig) bis 0,99 (sehr wichtig) vergeben. Die Einteilung basiert dabei auf den Erfahrungen des Produktentwicklers und den erfassten Kundenanforderungen. Jedes Kriterium in der normalisierten Matrix wird mit dem Gewichtungswert multipliziert.

**Formel 17: Gewichtung der Zielkriterien nach (Biesenbach, 2007)**

$$v_{ij} = w_j * r_{sj}$$

Tabelle 21: gewichtete normalisierte Matrix

		Alternativen					
		Min/ Max	Ge- wichte	Lager 1 Kugel	Lager 2 Rillen	Lager 3 Zylinder	Lager 4 Nadel
Zielkriterien	Zeit						
	MTTR (in Minuten)	Min	0,10	0,051	0,070	0,037	0,033
	MTBF (in Tagen)	Max	0,30	0,189	0,141	0,144	0,11
	Kosten						
	Installationskosten (in €)	Min	0,10	0,055	0,037	0,043	0,061
	Entsorgungskosten (in €)	Min	0,10	0,065	0,036	0,055	0,038
	Qualität						
	Verfügbarkeit (in Tagen)	Max	0,40	0,184	0,236	0,176	0,196

Anhand der berechneten Werte kann nun wiederum der Best- und der Worst-Case berechnet werden.

### 3. Berechnung der positiv-idealen und negativ-idealen Lösung

Diese werden durch die Ableitung zweier erstellter Alternativen realisiert, eine ( $A^+$  oder Best-Case Alternative) stellt dabei die beste Kombination aller Kriterien dar, die andere ( $A^-$  oder Worst-Case) die schlechteste. Diese werden berechnet durch folgende Formeln (Biesenbach, 2007), (Peters & Zelewski, 2007):

#### Formel 18: Best-Case Alternative

$$A^+ = \left\{ \left( \max_i \{v_{ij} | j \in J\} \right), \left( \min_i \{v_{ij} | j \in J'\} \right) \mid i = 1, \dots, n \right\}$$

$$= v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_m^+$$

#### Formel 19: Worst-Case Alternative

$$A^- = \left\{ \left( \min_i \{v_{ij} | j \in J\} \right), \left( \max_i \{v_{ij} | j \in J'\} \right) \mid i = 1, \dots, n \right\}$$

$$= v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_m^-$$

Mit  $J = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu Maximierungskriterium}\}$

$J' = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu Minimierungskriterium}\}$

Die Best - Case - Lösungen sind in der Tabelle 22 grün markiert, die Worst - Case - Lösungen rot. Hierbei ist, wie in den Formeln dargestellt, zu unterscheiden, ob ein Kriterium zu maximieren ist und somit der größte Wert der Beste ist oder zu minimieren, wo das Gegenteil zutrifft.



Daraus ergeben sich für das dargestellte Beispiel die Alternativen  $A^+$  und  $A^-$ :

$$A^+ = \{0,033; 0,189; 0,037; 0,036; 0,236\}$$

$$A^- = \{0,07; 0,11; 0,061; 0,065; 0,176\}$$

Tabelle 22: Bestimmung der Worst- bzw. Best-Cases

		Alternativen					
		Min/ Max	Ge- wichte	Lager 1 Kugel	Lager 2 Rillen	Lager 3 Zylinder	Lager 4 Nadel
Zielkriterien	<b>Zeit</b>						
	MTTR (in Minuten)	Min	0,10	0,051	0,07	0,037	0,033
	MTBF (in Tagen)	Max	0,30	0,189	0,141	0,144	0,11
	<b>Kosten</b>						
	Installationskosten (in €)	Min	0,10	0,055	0,037	0,043	0,061
	Entsorgungskosten (in €)	Min	0,10	0,065	0,036	0,055	0,038
	<b>Qualität</b>						
	Verfügbarkeit (in Tagen)	Max	0,40	0,184	0,236	0,176	0,196

Nun ist zu bestimmen, wie weit die Verbesserungsalternativen von diesen Lösungen entfernt liegen, um zu beurteilen, wie gut sie abschneiden.  $A^+$  gibt somit die Alternative an, die maximal zu erreichen und damit die optimale ist. Da die aktuelle Alternative (Kugellager) mit in die Berechnung eingeht, ist  $A^+$  in Abhängigkeit dieser bestimmt worden. So kann anschließend anhand der Rangfolge ermittelt werden, ob eine andere Alternative besser ist als die in der Nutzung befindliche.

#### 4. Berechnung des Abstandswerts

Für die Berechnung des Abstands wird das bereits bekannte Verfahren des Euklidischen Abstandes verwendet (vgl. Formel 14). Hiermit wird der Abstand zwischen jeder Alternative und der Best - Case- und Worst - Case - Alternative bestimmt, nach (Biesenbach, 2007):

**Formel 20: Abstand zu der besten Alternative mittels Abstandsmaß  $S_{i^+}$**

$$S_{i^+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

**Formel 21: Abstand zu der schlechtesten Alternative mittels Abstandsmaß  $S_{i^-}$**

$$S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Die Berechnung wird hierbei für jede Spalte durchgeführt. Für jede Alternative wird zu allen Kriterien zusammengefasst der Abstand zur idealen Lösung berechnet. Somit ergibt sich für jede Alternative zwei Werte, der Abstand zur besten und zur schlechtesten Alternative. Für die erste Spalte sieht dann die Berechnung wie folgt aus:

$$S_{1+} = \sqrt{(0,051 - 0,033)^2 + (0,189 - 0,189)^2 + (0,055 - 0,037)^2 + (0,065 - 0,036)^2 + (0,184 - 0,236)^2}$$

$$S_{1+} = 0,0647$$

$$S_{i+} = \{0,0647; 0,0606; 0,0777; 0,0918\}$$

Bei dem Abstandswert zu der Worst - Case - Alternative ist das Vorgehen wie zuvor beschrieben, nur dass hier die Werte von  $A^-$  zur Berechnung angewandt werden.

$$S_{i-} = \{0,0011; 0,0773; 0,0605; 0,0952\}$$

### 5. Berechnung der relativen Nähe (N) zu positiv-idealer Lösung:

Der berechnete Abstand dient als Mittel zur Vergleichbarkeit von Alternativen. Hierzu werden die zuvor berechneten Abstandswerte als Ausgangswerte genommen und in die folgende Formel eingesetzt (Biesenbach, 2007):

#### Formel 22: Relative Nähe

$$n_s = \frac{d_s^-}{d_s^+ + d_s^-} \text{ mit } 0 \leq n_s \leq 1$$

Hiermit lässt sich die folgende Zahlenreihe zur relativen Nähe berechnen:

$$N = \{0,17; 0,56; 0,44; 0,51\}$$

### 6. Reihenfolgebildung der Alternativen

Auf Basis der berechneten Nähe werden die Alternativen in eine Reihenfolge gebracht, was in dem letzten Schritt passiert:

$$R = (\text{Rang 4; Rang 1; Rang 3; Rang 2})$$

Alternative 2 steht somit auf Rang 1, da hier die relative Nähe am größten ist, somit würde nach TOPSIS das Rillennlager ausgewählt.

#### 6.4.5 Umsetzung des Entscheidungsunterstützung Moduls

Bereits bei der gesamten Dissertation ist bei der Realisierung des Assistenzsystems darauf zu achten, dass dem Produktentwickler eine Visualisierungsmöglichkeit gegeben wird, die nicht zu komplex und intuitiv nachvollziehbar ist. Daher ist eine zweckdienliche Visualisierungsmethode umzusetzen, anhand derer der Produktentwickler die besten Alternativen dargestellt bekommt, einschließlich des Abschneidens bei der Zielsetzung. Zur Umsetzung wird das PRD - Tool herangezogen. Dabei wird es einmal ein generelles Eigenschaftsprofil der Alternativen zu allen Zielsetzungen und deren Kriterien geben, aber auch eine feingranulare Darstellung zu jeder Zielsetzung und dem dortigen abschneiden. In der Abbildung 44 ist die Anbindung an das FAS zu sehen.

Zu dem EU - Modul sind in der Navigation unter „Entscheidungsfindung“ zwei Kategorien erstellt worden (siehe Punkt 1 auf der linken Seite), eine *zielorientierte* und eine *funktionsorientierte*. So kann bei der zielorientierten Kategorie entweder ein Report mit allen

Kriterien aufgerufen werden, ebenso gibt es die Möglichkeit, zu einem der drei Oberziele Zeit, Kosten und Qualität einen eigenen Report zu öffnen, die unter Dateien in ② hinterlegt sind.

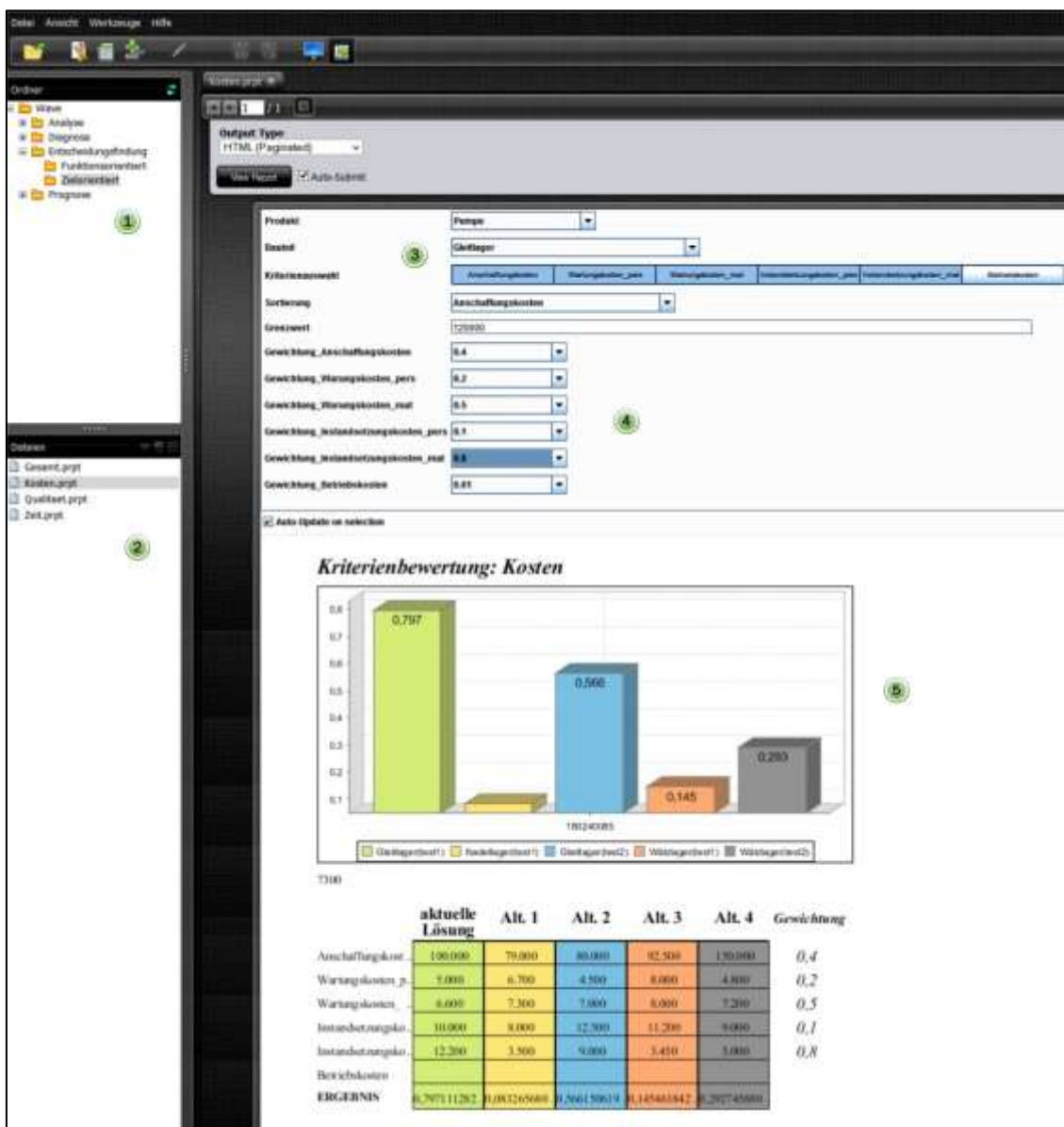


Abbildung 44: Entscheidungsunterstützung - Modul im FAS

Die zweite Kategorie, die *funktionsorientierte*, ordnet die erfassten Kennzahlen bestimmten Phasen bzw. Funktionen der Produkte zu. So lassen sich anhand der Feedbackdaten drei Schwerpunkte identifizieren:

*Instandhaltung*, wo alle Kriterien zugeordnet werden, die mittels der Feedbackdaten der Instandhaltung berechnet werden. Hierzu zählen die Wartungs- und Instandsetzungskosten, die Wartungsintervalle, etc.

*Produktnutzung*, hierzu zählen alle zur Phase selbst zugehörigen Kriterien, wie Produktivität, Umweltfreundlichkeit, Betriebsstunden, etc. und

*Randbedingungen*, also die Lebensdauer, die Anschaffungskosten, etc.

In dem Report steht am Anfang ③ die Auswahl eines potentiellen Produktes, zu dem die Verbesserungsalternativen berechnet werden sollen. Zu dem Produkt wird dann eine Komponente ausgewählt, die ersetzt werden soll (der Ersatz des gesamten Produktes entspräche keiner Verbesserung, sondern einer Neukonstruktion). Die dritte Sektion zeigt die zu dem Report zugeordneten Kriterien an. Da in diesem Beispiel die Kosten detailliert betrachtet werden sollen, handelt es sich auch nur um Kriterien dieser Kategorie. Der Produktentwickler kann nun beliebig viele Kriterien durch Anklicken auswählen (siehe in Abbildung 44 die dunkelblauen Balken). In dem dargestellten Beispiel sind alle Kostenkennzahlen bis auf die Betriebskosten ausgewählt worden. Zur Reduktion der Berechnungszeit ist nun ein Kriterium zur Sortierung der Daten aus der DB auszuwählen, einschließlich eines Maximalwertes. Hier wären das die Anschaffungskosten, wenn eine Komponente weit über den Anschaffungskosten läge, würde sie bei der Bewertung nicht weiter berücksichtigt.

Wie in den Zielen gefordert ist die variable Auswahl umgesetzt worden, sodass vom Produktentwickler selbst bestimmt werden kann, welche Ziele zur Berechnung herangezogen werden. Zudem hat der Produktentwickler auch noch die Möglichkeit, dies ④ nach den Prioritäten des Kunden zu gewichten (s.o.). Das Ergebnis ist dann die darunter liegende Darstellung ⑤ mit einem Balkendiagramm der besten fünf Alternativen und einer Tabelle, in der die konkreten Werte zur Nachverfolgung aufgeführt sind. In dem Balkendiagramm sind die berechneten Werte der relativen Nähe (Schritt 5 bei TOPSIS) dargestellt, die zwischen 0 und 1 liegen. Hierbei gilt: je größer der Wert für die Nähe, desto „näher“ liegt die Alternative bei der angestrebten berechneten positiv-idealen Lösung. So schneidet in diesem Fall die aktuelle Lösung mit 0,797 im Vergleich zu den anderen vier Alternativen am besten ab. Somit konnte hier aus Kostensicht keine bessere Alternative gefunden werden.

#### 6.4.6 Prognose

*„Prognosen sind Voraussagen über einen zukünftigen, realen Sachverhalt, die auf der Grundlage von praktischen Erfahrungen und/oder theoretischen Erkenntnissen getroffen werden.“* (Haustein, 1970), (Götze, 2008). Bei jedem entwickelten Produkt gibt es immer eine Vielzahl von variierenden Lösungsmöglichkeiten die umgesetzt werden können vom Produktentwickler. Die Vielfalt ist bereits bei einfachen Produkten so groß, dass kein vollständiges Lösungsfeld erzeugt werden kann (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Die Alternativen lassen sich allgemein klassifizieren nach den verschiedenen Merkmalen, die umgesetzt werden können. Die **Prognose** hat das Ziel den Erfolg zu den Charakteristika einer Alternative für die Produktverbesserung zu berechnen.

Wenn eine Alternative, d.h. eine Komponente oder ein Bauteil ausgewählt wurde, kann der Produktentwickler zw. verschiedenen Ausprägungen bzw. Charakteristika wie Material, Form, etc. wählen (vgl. Abbildung 45). Auch wird der Umfang der Lösungsmöglichkeiten in der Klassifikation deutlich, aus denen aktuell noch kein aussagekräftiges BN generiert werden könnte. Zu den Komponenten oder Bauteilen müssen zuerst die Charakteristika identifiziert und zugeordnet werden, die für eine spezielle Komponente tatsächlich Anwendung finden. Folglich wird das Lösungsfeld reduziert und damit auch konkretisiert.

		Alternativen der Körper/ Flächen		Alternativen bei den Beziehungen
Äußere Gestalt		Form: → Krümmungsradien, → Begrenzungsflächen, ...		Verbindungsart: → starr/ gelenkig/ elastisch → lösbar/ unlösbar → Stoff- / Form- / Kraftschluss
		Lage: → Bezuglinien (Mittellinie) ...		Berührungs- und Kontaktart → Punktberührung → Linienberührung → Flächenberührung
		Anzahl: → Umrisskanten,...		Kopplungsart → berührend (gleitend, rollend, walzen...) → nicht berührend (Lager)
		Größe: → an sich, → Abstand zueinander		Verbindungsstruktur
Funktional		Stoffliche Eigenschaften: → Stoff Art (Zustand, z.B. fest, flüssig, Verhalten) → Werkstoff (Art, Qualität)		Bewegungen: → Bezugssystem → Bewegungsarten → zeitl. Verlauf,...
	Weitere Alternativen Bereiche	Kraftübertragung: → Lagerstellen → elast. Glieder (z.B. Feder) → Schaltungsart,...	Austausch Komponente  Kompaktheit (massiv/ hohl)	Fertigungs- und Montageart  Getriebeart  Reihenfolge  ...

Abbildung 45: Allgemeine Klassifikation der Charakteristika

Zur Modellierung dieses Sachverhaltes, des Prognose Netzwerkes, werden zu Beginn OOBNs genutzt (Dienst et al., 2014). In der Abbildung 46 ist der Aufbau der OOBN für die Lageralternativen dargestellt. Hierbei sind die Feedbackdaten dieselben wie bei der Diagnose, ergänzt um die Charakteristika. Für die andern Komponenten der Pumpe sind individuelle OOBN zu designen.

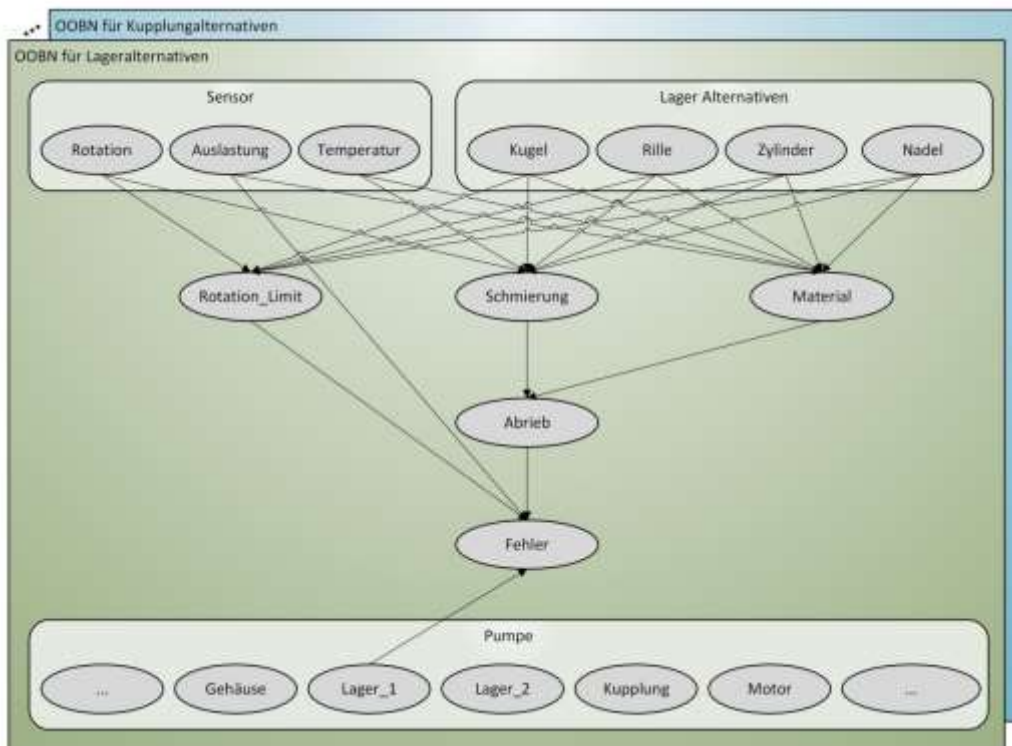


Abbildung 46: Erweitertes OOBN um Charakteristika der Alternativen (Abramovici et al., 2013)

Hinzugekommen ist das Objekt *Lager Alternativen*, wo die Instanzknoten für die verschiedenen Lagertypen (Zylinder,...) stehen. Die Objekte sind hier verbunden über die *Charakteristika* Knoten, statt wie zuvor über die *Fehler*. Der einzige *Fehler* Knoten der hier betrachtet wird, ist der zu dem Lager selbst, womit die Charakteristika verbunden sind. Für das Lager sind die relevanten Charakteristika das zu verwendende *Material*, die *Schmierung*, der *Abrieb* des Lagers sowie das *Limit der Rotationsgeschwindigkeit* selektiert worden. Die Eigenschaften sind für alle Lagertypen gleich relevant, nur die Ausprägungen variieren. So liegt bei dem Rillengleitlager das Rotationslimit bei 260 [1/Min] und bei dem Kugellager liegt es bei 225 [1/Min].

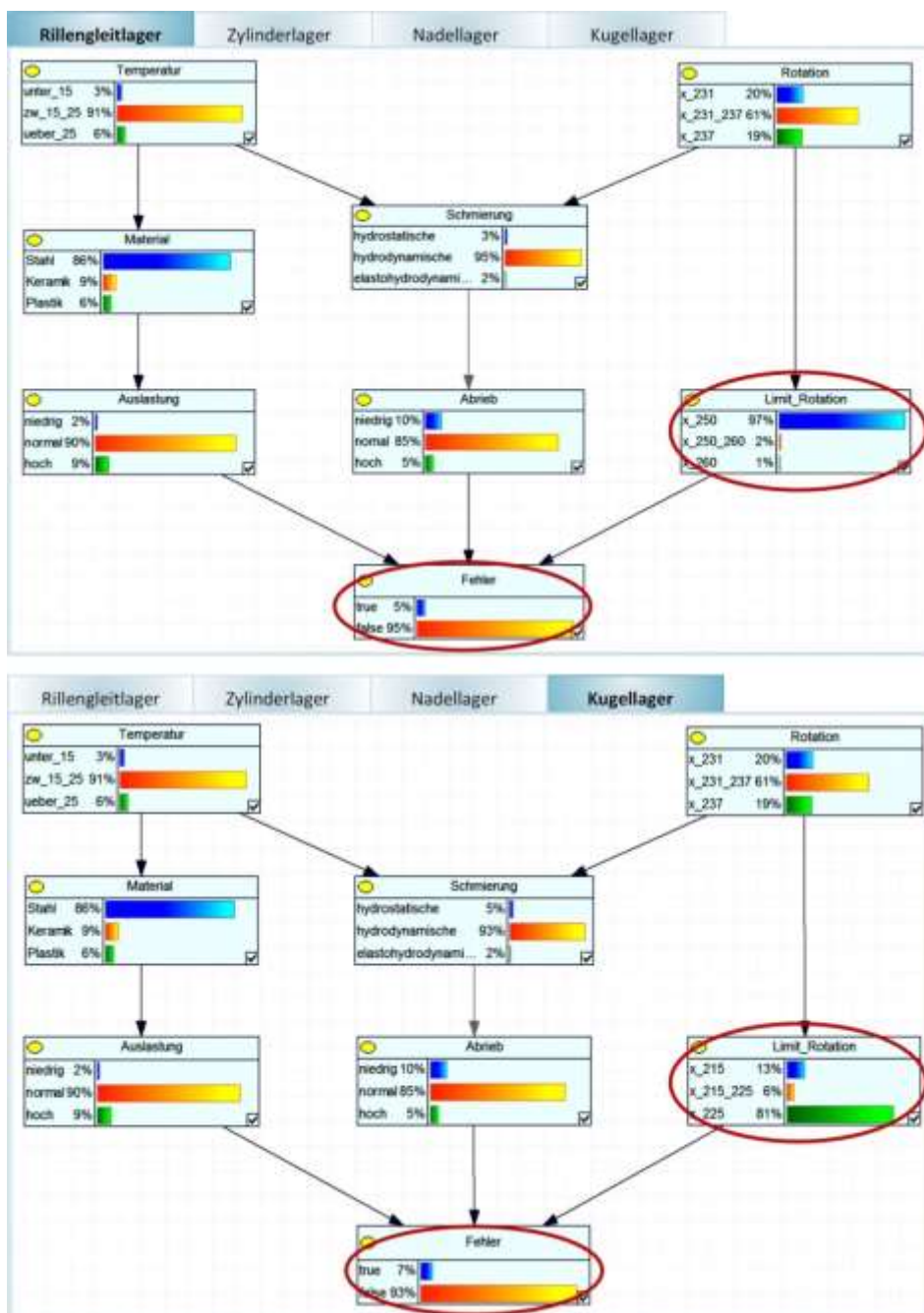


Abbildung 47: Prognose Netzwerk zu zwei Lageralternativen

Zu jeder Alternative wird auf Basis des OOBN und der Feedbackdaten ein BN gelernt, die Ergebnisse kann der Produktentwickler sodann gegenüberstellen und den erwarteten Erfolg ableiten vgl. Abbildung 47. So kann auch hier eine What-If Analyse durchgeführt werden, um bspw. Rückschlüsse ableiten zu können wie welches Material am geeignetsten ist, für den aktuellen Kunden (Abramovici et al., 2013). So ist in dem Beispiel die Evidenz gesetzt worden, das die *Temperatur*  $> 35^{\circ}\text{C}$  ist. Daraufhin hat sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Netzes geändert, bei Material und Schmierung. So lässt sich ablesen, das bei einer Hohen Temperatur das Material Stahl besser geeignet scheint als die anderen zur Verfügung stehenden Materialien, da die Wahrscheinlichkeit hierfür von 86% auf 95% gestiegen ist.

Als Fazit ist festzuhalten, dass es möglich ist aus den BN ein Prognose Netzwerk zu generieren, es aber mit einigen Aufwand verbunden ist. Hier ist vor allen die Modellierung der OOBN zu nennen, wo die Charakteristika selektiert werden müssen und die Eigenschaften (wie Grenzwerte) integriert werden müssen. Diese sind wiederum für jede Alternative zu bestimmen. Somit wird der Erstellungsaufwand den späteren Nutzen voraussichtlich übersteigen.

## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Fazit

Im Rahmen der Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung eines FAS dargestellt worden, zur prozessübergreifenden Abbildung, Verwaltung und Verarbeitung von *strukturierten Produktnutzungsinformationen*, die automatisch mittels Condition Monitoring Methoden oder bei Servicemaßnahmen an bzw. im Umfeld von Industriegütern gewonnen werden und ohne subjektive Meinungen von Menschen sind. Das FAS ist auf Basis von Data Warehouse Technologien umgesetzt worden und in Verbindung mit einer, aufeinander abgestimmten und intuitiv bedienbaren, wissensbasierten Methodenkombination. Durch die tiefgreifende Analyse der Produkte in der Nutzung, ist gezielt Verbesserungspotential identifiziert worden, um so die Entwicklungszeiten zu kürzen und die Qualität zu erhöhen. Das Ziel ist mit geringem Zeit und Kostenaufwand die Schwachstellen der bisherigen Produktgeneration  $n$  zu beseitigen und dadurch die Qualität zu steigern. Durch die Rückführung der Informationen aus der Nutzungsphase können die Verbesserungen schneller umgesetzt werden, da die Fehlerursachen, bzw. Handlungsalternativen schneller erkannt werden können. Die hier dargestellten Ergebnisse sind im Rahmen des DFG Forschungsprojektes WiRPro erarbeitet und verifiziert worden. Das Ziel der Arbeit war, die zu Beginn formulierten Forschungsfragen im Rahmen der Arbeit zu beantworten, was wie folgt erreicht wurde:

- 1) *Welche strukturierten Daten aus dem Produktkontext sind relevant für die Rückführung in den Produktverbesserungsprozess?*

Das FAS wird angewandt zur Verbesserung einer Produktgeneration und nicht individueller Produkte. Daher ist eine Vielzahl von Daten verschiedener Instanzen einer Generation erforderlich um a) *eine aussagekräftige wissensbasierte Diagnose zu erstellen* und b) *eine allgemeingültige Aussage abzuleiten*. Als Limitation des FAS ist festzustellen, dass nicht für jede Produktklasse eine Verbesserung angeboten werden kann. Es können nur Produkte betrachtet werden, zu denen auch strukturierte Feedbackdaten erzeugt und verwaltet werden, so fallen Konsumgüter komplett aus der Betrachtung heraus und der Fokus liegt auf Industriegütern. Strukturierte Feedbackdaten sind quantifizierbar und lassen sich mit Werten in Verbindung mit Maßeinheiten beschreiben wie Messwerte, Kosten, oder Zeit. Die Quellen hierfür sind Sensoren, am und im Umfeld der Industriegüter, aber auch Instandhaltungsdaten können mittels geeigneter Tools erfasst und übertragen werden. Die Sensordaten werden aktuell hauptsächlich eingesetzt, zur Umsetzung der Instandhaltungsstrategien und der Optimierung dieser und kaum in der Entwicklung betrachtet. Dabei wird der Grundstein zu einer geringen Fehleranfälligkeit und damit zu einer hohen Verfügbarkeit in der Entwicklung gelegt, womit die Daten relevant für das FAS sind.

Aktuell werden die Instandhaltungsdaten hauptsächlich unstrukturiert, d.h. mittels Protokolle erfasst und sind damit nicht anwendbar für das FAS. Daher ist im Rahmen der Arbeit eine Lösung zur strukturierten Erfassung dieser, durch die Konzeption und Realisation des *mobilen Instandhaltungsgeräts* gezeigt worden. Zudem sind die Lebenszykluskosten als

---



relevante Daten zu nennen, die aktuell während der Entwicklung selten beachtet werden, die jedoch vom Kunden vermehrt im Fokus zur Kaufentscheidung stehen, anstatt ausschließlich der Investitionskosten. Die Feedbackdaten schließen daher die Lebenszykluskosten aus dem Bereich Instandhaltung und Betrieb mit ein und werden durch das FAS für den Produktentwickler transparent gemacht.

Für die genannten Feedbackdaten ist ein zentrales Datenmodell für das FAS angelegt worden, in das für jede Produktklasse variable Feedbackdaten verwaltet werden können. Übertragen werden die Daten mittels der Anwendung eines ETL Tools. Somit ist die Datenbasis für das FAS gelegt worden und es stellt sich die nächste Frage:

### 2) *Wie kann aus den Feedbackdaten Produktverbesserungswissen generiert werden?*

Um sinnvoll nutzbares Verbesserungswissen zu generieren, ist zuerst der Produktentwicklungsprozess im Detail betrachtet worden, um aufzudecken wo genau der Wissenstransfer Vorteile bringt. So sind drei Einsatzgebiete identifiziert worden a) in der Analysephase der Produktverbesserung zur *Evaluierung der Kundenanforderung* und Auslösung des Verbesserungsprozess, b) bei der Konzeption zur *Aufdeckung von Fehlerursachen* und c) basierend darauf eine Entscheidungsunterstützung bei der *Auswahl einer Verbesserungsalternative*.

Da es keine Methode gibt die für alle Einsatzgebiet eine Lösung anbietet, ist eine wissensbasierte Methodenkombination umgesetzt worden. Für a) eignen sich Reports, womit die quantifizierbaren Kennzahlen (MTTR, MTBF,...) der Anforderungen des Kunden an das Produkt aus den Feedbackdaten berechnet und visualisiert werden. Sodass diese dem Produktentwicklung direkt zur Verfügung stehen und er entscheiden kann, ob eine Produkteverbesserung erforderlich ist oder nicht. Der Vorteil ist die Darstellung am Desktop, wobei die Kennzahlen jeweils direkt aus der Datenbasis berechnet werden und somit immer aktuell sind.

Für das Einsatzgebiet b) konnten die BN als Diagnosemodell im Kontext der Produktentwicklung voll überzeugen. Es handelt sich dabei um eine komplexe Methode, die einen Überblick über eine große Datenmenge liefert und auch das Ableiten von Wissen ist daraus möglich. Dabei zeichnen sich die BN durch eine einfache Anwendung und graphische Darstellung aus, sodass es keine Hemmschwelle gibt, diese anzuwenden und zu interpretieren. Bei den BN handelt es sich allerdings um eine statische Methode, sodass temporale Verteilungen nicht dargestellt werden. Auch ist ein Problem, das jede Maschine mit individuellen Sensoren ausgestattet ist, sodass die Daten aus denen das BN gelernt wird variieren. Damit verbunden ist ein hoher Aufwand bei der Auswahl der Daten aus denen ein BN gelernt wird. Um diesen Nachteil entgegen zu wirken, sind Erweiterungen der BN eingesetzt worden.

Es hat sich gezeigt, dass die Erweiterungen sinnvoll und notwendig sind. So ist es erforderlich, die BN nicht zu komplex werden zu lassen, damit sie einerseits intuitiv verständlich sind und andererseits auch die Lernalgorithmen noch angewandt werden können. So wird zu einer Maschine ein generelles Netz, ein objektorientierten BN modelliert, wo alle Daten zu Komponenten zugeordnet werden. Daraus lassen sich dann in einem nächsten Schritt

Subnetze genieren. Auch ist dadurch eine gute Grundlage zum interdisziplinären Austausch zw. Produktentwickler und Wissensingenieur gegeben. Denn für die Erstellung eines aussagekräftigen OOBN ist eine intensive Abstimmung zwischen beiden Bereichen erforderlich. Zudem gibt die temporale Verteilung bei den dynamischen BN noch einen zusätzlichen interessanten Aspekt, bei der Vorhersage von dem Maschinerhalten im Vergleich zu den BN. So lassen sich aus den dynamischen BN Rückschlüsse in Abhängigkeit von Zeitintervallen zu dem Produkt in der Nutzung ziehen, um daraus Potential zur Verbesserung abzuleiten.

3) *Wie kann dieses Wissen in der Produktentwicklung zur Entscheidungsunterstützung bei einer tiefgreifenden Verbesserung bestehender Produkte führen?*

Als letztes die Methode zu dem Einsatzgebiet c), die Unterstützung bei den zu treffenden multikriteriellen Entscheidungen. Hierfür hat sich TOPSIS bewährt, womit die Verbesserungsalternativen anhand der Feedbackdaten, die sich zu unterschiedlichen Kriterien zuordnen lassen, bewertet werden. Für die Bewertung ist die Zielsetzung der Produktentwicklung berücksichtigt worden, wo es sich um konkurrierende und gegenseitig beeinflussbare Zielgrößen aus Zeit, Kosten und Qualität handelt. Diese können teilweise auch über die Feedbackdaten berechnet werden, wobei eine Herausforderung war, die Werte vergleichbar zu machen. Das Entscheidungsunterstützung Modul ist in das FAS integriert worden, zur Auswahl der besten Alternativen. So ist hier ein großer Vorteil, dass die Bewertung frei von subjektivem Einfluss ist und nur auf den Feedbackdaten beruht. Hierdurch können dem Entwickler Alternativen aufgezeigt werden, die dieser bisher noch nicht berücksichtigt hat, da diese bspw. von einem anderen Entwickler stammen. Das Entscheidungsunterstützung Modul begünstigt damit den Wissenstransfer in dem Unternehmen, indem personenunabhängig Alternativen empfohlen werden.

Ziel des FAS war es, die Zeit für eine Produktverbesserung zu verkürzen und zudem eine deutliche Verbesserung bestehender Produkte hervorzubringen. Erreicht werden konnte dies durch die Unterstützung und teilweise Automatisierung, vor allem aber die Strukturierung des Informationsrückflusses in die Produktverbesserung. Durch die Bereitstellung notwendiger Informationen im Produktverbesserungsprozess in dem FAS für den Produktentwickler, stehen eben diesem wichtige Informationen zur effizienten Produktverbesserung zur Verfügung. Eine lange Suche nach Schwachstellen und Fehlerursachen entfällt dank des neu entwickelten Ansatzes und der Anwendung neuartiger Methoden. Zwar wird nicht die Suche nach neuen Lösungsansätzen oder -prinzipien unterstützt, sehr wohl aber die Entscheidung für oder gegen eine mögliche Lösungsalternative. Ohne die eingeführten Module und Methoden wäre dies nicht möglich. Die Arbeit hat somit Methoden hervorgebracht, die effizient eine Produktverbesserung unterstützen.

## 7.2 Ausblick

Das FAS bildet eine Basis für einen Wissenstransfer aus der Produktnutzung in die Entwicklung, wo es noch Potential gibt dieses zu erweitern. Hier ist die Idee zu einem weiteren DFG Antrag „KonWiss“ entstanden. KonWiss steht für „Kontextbasierte Wissensgenerierung aus unstrukturierten Instandhaltungs-, Service- und Kundeninformationen zur Verbes-

---

serung von Industriegütern“. Bisher werden nur die strukturierten Daten erfasst und analysiert, aber auch die unstrukturierten Daten verfügen über einen hohen Informationsgehalt, der die Ergebnisse des FAS noch erweitern und verbessern könnte. Das beantragte Projekt „KonWiss“ hat daher zum Ziel, den Produktentwickler zu unterstützen, indem während der Produktnutzungsphase unstrukturierte und in Textform erstellte Instandhaltungs-, Service- und Kundeninformationen in den Kontext der Produktentwicklung eingebracht werden.

Für die Verarbeitung unstrukturierter Textdaten sind im Rahmen des Wissensmanagements der Produktentwicklung bislang fehlende dem Kontext angepasste Text-Mining Methoden zur Erkennung von Produkten, Produktgenerationen und Fehlerbeschreibungen und deren Beziehungen untereinander zu erstellen. Eine Visualisierung des mit Text-Mining Methoden gewonnenen Wissens findet unter Verwendung nutzwertorientierter Visualisierungsmethoden in der gewohnten Arbeitsumgebung des Produktentwicklers statt. Die Visualisierung wird in vorhandene IT-Systeme eingebettet und stellt punktgenau, dass für eine Produktverbesserung oder Produktentwicklung benötigte Wissen bereit. Mit dieser Erweiterung des FAS sollen aktuelle und zukünftige Produkte verbessert werden (Dienst et al., 2012). Hierfür sind drei Forschungsfragen definiert worden:

- a) *Wie können die Produkte automatisch in den Texten erkannt werden und zu Produkten zugeordnet werden?*
- b) *Wie kann aus der Textsammlung mittels Text Mining Verfahren Wissen generiert werden?*
- c) *Wie kann das Wissen in den Produktentwicklungskontext durch geeignete Visualisierungsverfahren integriert werden?*

Nachdem die Begriffe durch die Produkterkennung in Texten eindeutig zugeordnet werden können, ist es möglich, ausschließlich auf der vorhandenen Textbasis, Beziehungen zwischen den Produkten herzustellen. Hierfür findet das am Institut für Wissensbasierte Systeme entwickelte Verfahren „Concept for the Imitation of the Mental Ability of Word Association“ (CIMAWA) Anwendung (Uhr et al., 2012). CIMAWA ist ein statistisches Verfahren zur technischen Nachbildung der menschlichen Wortassoziation (Uhr et al., 2012). Hierdurch könnte eine Semantische Produktstruktur ermittelt werden, anhand der Beziehungen in den Texten. Das erhoffte Ziel dabei ist, das Zusammenhänge zw. Komponenten aufgedeckt werden, die von der klassischen hierarchischen Produktbeziehungen, wie sie in PLM Systeme vorliegen abweicht und sich somit neue Erkenntnisse ableiten lassen. Auf Basis dessen könnten die Texte, direkt in das FAS integriert werden durch Empfehlungen, sodass hier keine langwierige Suche erforderlich wäre. Zudem ist damit die Basis geschaffen, für weitere Auswertungen mittels Text Mining Methoden.

---

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Abbildungen

Abbildung 1: Feedbackfluss.....	3
Abbildung 2: Vorgehensplan der Produktentwicklung nach VDI 2221 .....	7
Abbildung 3: V-Modell nach VDI 2206.....	8
Abbildung 4: Feedbackdaten .....	18
Abbildung 5: Instandhaltungsstrategien nach (Matyas, 2002), (Schnek, 2010) .....	21
Abbildung 6: Semantische Zuordnung.....	24
Abbildung 7: Wissensrepräsentationsformen.....	27
Abbildung 8: Informationsfluss zw. Feedback Erzeugern und Systemen.....	30
Abbildung 9: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 2.....	31
Abbildung 10: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 3.....	32
Abbildung 11: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 4.....	33
Abbildung 12: Prozessorientierte Darstellung von Anwendungsfall 5.....	34
Abbildung 13: Konzeptbild des FAS zur EU in der Produktverbesserung.....	35
Abbildung 14: Feedbackfluss des Assistenz System .....	36
Abbildung 15: Sensoren einer Radialkreiselpumpe.....	42
Abbildung 16: 5- Schichten Architektur.....	48
Abbildung 17: Übertragung der Feedbackdaten mittels ETL.....	56
Abbildung 18: Datenmodell realisiert mit MySQL Workbench .....	58
Abbildung 19: Datenfluss bei der Instandhaltung mit dem mobilen Gerät.....	62
Abbildung 20: Konzept des mobilen Instandhaltungsgeräts .....	63
Abbildung 21: Screenshots von dem mobilen Endgerät .....	66
Abbildung 22: Diagrammtypen.....	68
Abbildung 23: Abgrenzung der Zeit-Kennzahlen zur Dauer.....	69
Abbildung 24: Analyse der Kosten .....	74
Abbildung 25: Verlauf der Messwerte Temperatur .....	75
Abbildung 26: Daten zur Zuverlässigkeit .....	76
Abbildung 27: zeitbasierte Kennzahlen der Instandhaltung: MFT, MTTRS und MRT .....	76
Abbildung 28: Beispiel für die graphische Darstellung eines BN .....	80
Abbildung 29: KF in WEKA zur automatischen Generierung eines BN.....	82
Abbildung 30: BN zu dem Lager der Radialkreiselpumpe.....	84
Abbildung 31: BN mit der gesetzten Evidenz „Defekt an Lager 1“ .....	85
Abbildung 32: BN mit gesetzter Evidenz „Umgebungstemperatur > 25,3°C“ .....	85
Abbildung 33: KL-Divergenz bei den verschiedenen Sampling-Verfahren.....	88

---

Abbildung 34: Kombination von OOBN, BN und DBN .....	89
Abbildung 35: Prozessschritte zur Umsetzung der Kombination von BNs .....	92
Abbildung 36: OOBN des BHKW .....	93
Abbildung 37: BN der Komponente „Abgaswärmeübertrager“ .....	94
Abbildung 38: BN mit gesetzten Evidenzen.....	95
Abbildung 39: DBN.....	95
Abbildung 40: Ausschnitt des DBN zu Quartal 1+2 .....	96
Abbildung 41: Konzept des Entscheidungsprozess.....	98
Abbildung 42: Wälz- und Gleitlager .....	99
Abbildung 43: Darstellung des Zielsystems.....	102
Abbildung 44: EU Modul im FAS.....	115
Abbildung 45: Allgemeine Klassifikation der Charakteristika.....	117
Abbildung 46: Erweitertes OOBN um Charakteristika der Alternativen.....	117
Abbildung 47: Prognose Netzwerk zu zwei Lageralternativen .....	118

## 8.2 Tabellen

Tabelle 1: BMBF Forschungsprojekte zu Condition Monitoring.....	14
Tabelle 2: Beispielhafte Zuordnung von Sensoren zu Maschinen nach DIN ISO 17359 .....	23
Tabelle 3: Anforderungen an das Beispielprodukt.....	39
Tabelle 4: Sensordaten einer Radialkreiselpumpe .....	43
Tabelle 5: Servicedaten .....	43
Tabelle 6: Verbindung von Sensordaten und Fehlerursachen.....	44
Tabelle 7: Feedbackdaten des BHKW.....	46
Tabelle 8: Funktionale Anforderungen.....	50
Tabelle 9: Anwendungsbezogene Anforderungen an das DWH.....	51
Tabelle 10: Sicherheitsbasierte Anforderungen an das DWH.....	52
Tabelle 11: Gegenüberstellung der Open Source DWH Lösungen .....	53
Tabelle 12: Anforderungen aus der Instandhaltung .....	60
Tabelle 13: Anforderungen aus dem Bereich <i>Mobile Computing</i> .....	61
Tabelle 14: Kennzahlen der statistischen Analyse.....	72
Tabelle 15: KL-Divergenz der Sampling-Verfahren .....	87
Tabelle 16: Paarweiser Vergleich der Lageralternativen.....	100
Tabelle 17: Zielkriterien zu Zeit, Kosten und Qualität.....	103
Tabelle 18: Bewertungsverfahren .....	107
Tabelle 19: Entscheidungsmatrix .....	110
Tabelle 20: normierte Entscheidungsmatrix .....	111
Tabelle 21: gewichtete normalisierte Matrix.....	112
Tabelle 22: Bestimmung der Worst- bzw. Best-Cases.....	113

### 8.3 Formeln

Formel 1: Mittlere Laufdauer (Mean Time Between Failures).....	70
Formel 2: Mittlere Ausfalldauer (Mean Time To Repair).....	70
Formel 3: Technische Verfügbarkeit .....	70
Formel 4: Technische Zuverlässigkeit.....	70
Formel 5: Gesamte Kosten der eingesetzten Ersatzteile.....	72
Formel 6: Durchschnittliche Kosten der eingesetzten Ersatzteile.....	72
Formel 7: Gesamte Kosten des Servicemitarbeiters .....	72
Formel 8: Durchschnittliche Kosten des Servicemitarbeiter .....	72
Formel 9: Durchschnittliche Kosten der Servicemaßnahme.....	72
Formel 10: Gesamt Kosten der Servicemaßnahme .....	72
Formel 11: Bayes' Theorem.....	78
Formel 12: Angepasste Kullback-Leibler-Divergenz .....	86
Formel 13: Dynamisches Bayes'sches Netz .....	91
Formel 14: Euklidische Distanz (ED) bzw. Abstand:.....	110
Formel 15: Normalisierung der Entscheidungsmatrix, wenn $e_{ij}$ ungleich 0.....	111
Formel 16: Normalisierung der Entscheidungsmatrix, wenn $e_{ij}$ gleich 0 .....	111
Formel 17: Gewichtung der Zielkriterien .....	111
Formel 18: Best-Case Alternative .....	112
Formel 19: Worst-Case Alternative.....	112
Formel 20: Abstand zu der besten Alternative mittels Abstandsmaß $S_i +$ .....	113
Formel 21: Abstand zu der schlechtesten Alternative mittels Abstandsmaß $S_i -$ .....	113
Formel 22: Relative Nähe .....	114

## 8.4 Literaturverzeichnis

- Abramovici, M.; Lindner, A. & Dienst, S.: Use Case of providing Decision Support for Product Developers in Product Improvement Processes. In *5th Int. Conference on Integrated Systems, Design and Technology (ISDT)*. Mallorca, 2012.
- Abramovici, M.; Fathi, M.; Holland, A. & Neubach, M.: PLM-basiertes Integrationskonzept für die Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung. *WT Online; Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG.*, 2008
- Abramovici, M.; Lindner, A.; Dienst, S. & Fathi, M.: Predicting the behavior of solution alternatives within product improvement processes. In *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design 2013 (ICED)*, 2013.
- Abramovici, M.; Lindner, A.; Walde, F.; Dienst, S. & Fathi, M.: Decision support for improving the design of hydraulic systems by leading feedback into product development. In *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design 2011 (ICED11)*. Denmark Technical University, Kopenhagen, Denmark, 2011.
- Alcalde Rasch, A.: *Erfolgspotential Instandhaltung - Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements*. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, 2000.
- Al-Hames, M.A.: *Graphische Modelle in der Mustererkennung (Dissertation)*. München: Technischen Universität München, 2008.
- Alpaydin, E.: *Introduction to Machine Learning*. 2nd ed. Massachusetts Institute of Technology - MIT Press, 2010.
- Ansari, F.; Dienst, S.; Uhr, P. & Fathi, M.: Using Data Analysis for Discovering Improvement Potentials in Production Process. In *Joint IEEE International Conference on Industrial Electronics (IEEE ICIT 2011)*. Auburn, Alabama, USA, 2011.
- Ansari, F.; Fathi, M. & Seidenberg, U.: Developing an Algebraic Model for Administrating Preventive Maintenance Cost of Production Machines., 2012.
- Ansari, F.; Uhr, P. & Fathi, M.: Textual Meta-analysis of Maintenance Management's Knowledge Assets. *International Journal of Services, Economics and Management (IJSEM)*, Inderscience Publisher. (2013 angenommen).
- Backhaus, K; Becker, J.; Beverungen, D.; Frohs, M.; Knackstedt, R.; Müller, O.; Steiner, M.; Weddeling, M.: *Vermarktung hybrider Leistungsbündel: Das ServPay-Konzept*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Backhaus, K. & Voeth, M.: *Industriegütermarketing*. 9th ed. München : Vahlen, 2009.
- Balzert, H.: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*. 3rd ed. Heidelberg, Deutschland: Sepktrum Akademischer Verlag, 2009.



- Balzert, H.: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. 3rd ed. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- Bamberg, G.; Coenenberg, A.G. & Krapp, M.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 15th ed. Vahlen, 2012.
- Bandow, G.; Kuhn, A. & Kuhnert, F.M.H.: *Wissensbasiertes Innovationsmanagement - Assistenzsystem zur Erfahrungssicherung und Wissensgenerierung für Instandhaltungsdienstleistungsunternehmen*. In Carell, A., Herrmann, T. & Kleinbeck, U. *Innovationen an der Schnittstelle zwischen technischer Dienstleistung und Kunden 1 - Konzeptionelle Grundlagen*. Heidelberg: Physica-Verlag. pp.181-95, 2007.
- Barthelmeß, U. & Furbach, U.: *IRobot – uMan: Künstliche Intelligenz und Kultur: Eine Jahrtausendealte Beziehungskiste*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Bauer, A. & Günzel, H.: *Data Warehouse Systeme - Architektur, Entwicklung, Anwendung*. Heidelberg: dpunkt Verlag, 2009.
- Bayes, T., 1763. *An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 53 (1763), 370–418.
- Becker, J.; Delfmann, P. & Rieke, T.: *Effiziente Softwareentwicklung mit Referenzmodellen*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2007.
- Beetz, S.: *Beitrag zur Methode der Arbeitsplatz-integrierten Assistenz am Beispiel der Formmesstechnik. Dissertation*. Nürnberg: Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- Behme, W. & Mucksch, H.: *Data Warehousegestützte Anwendungen*. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr.Th. Gabler GmbH, 2001.
- Beierle, C. & Kern-Isberner, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen – Algorithmen – Anwendungen*. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- Beißel, S.: *Ontologiegestütztes Case-Based Reasoning: Entwicklung und Beurteilung semantischer Ähnlichkeitsindikatoren für die Wiederverwendung natürlichsprachlich repräsentierten Projektwissens*. 1st ed. Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Belton, V. & Stewart, T.J.: *Multiple Criteria Decision Making - An Integrated Approach*. Boston, London: Cluwer Academic Publisher, 2002.
- Ben Gal, I.: Bayesian Networks. In Ruggeri, F., Kenett, R. & Faltin, F. *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. UK: John Wiley & Sons, 2007.
- Bergmann, D.: *Neuronale Mechanismen zeitabhängiger Prozesse bei audiovisueller Verarbeitung. Dissertation*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2010.
-

- Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; H.-J., Wunderlich: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme - Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Biesenbach, A.: *Multi-Site-Scheduling in der chemischen Industrie - Anlagenbelegungsplanung bei international verteilten Standorten*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2007.
- Blohm, H., Lüder, K. & Schaefer, C., 2006. *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. München: Verlag Franz Vahlen.
- Bodendorf, F.: *Daten- und Wissensmanagement*. Berlin: Springer Verlag, 2006.
- Bollmann, T. & Zeppenfeld, K.: *Mobile Computing*. Herdecke: W3L-Verlag, 2010.
- Borgelt, C. & Kruse, R.: *Graphical Models. Methods for Data Analysis and Mining*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2002.
- Bouckaert, R.R.: *Bayesian Network Classifiers in WEKA*. Australia: University of Waikato, 2008.
- Bouman, R. & Dongen, J.v.: *Pentaho Solutions - Business Intelligence and Data Warehousing with Pentaho and MySQL*. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc, 2009.
- Bracht, U.; Geckler, D. & Wenzel, S.: *Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
- Brandherm, B.: *Eingebettete dynamische Bayessche Netze n-ter Ordnung (Dissertation)*. Saarbrücken: Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät I der Universität des Saarlandes, 2006.
- Brandt-Pook, H. & Kollmeier, R.: *Softwareentwicklung kompakt und verständlich - Wie Softwaresysteme entstehen*. 1st ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- Brecher, C. (Hrsg.): *ZuPack - Zustandsorientierte Instandhaltung bei Verpackungsmaschinen*. Band 5 der Reihe "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung", Aachen: Apprimus Verlag, 2010.
- Brecher, C. (Hrsg.): *Zuverlässige Produktionsanlage (ZuPro)*. Band 6 der Reihe "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung" Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2011.
- Breiting, A. & Knosala, R.: *Bewerten technischer Systeme - Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- Burmester, L.: *Adaptive Business-Intelligence Systeme: Theorie, Modellierung und Implementierung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
-

- Capgemini: *Studie IT-Trends 2011. Unternehmen fordern wieder Innovation, 2011 Online: <http://www.de.capgemini.com/ressourcen/it-trends-studie-2011> (Zugriff: Mai, 2014).*
- Chamoni, P. & Gluchowski, P.: *Analytische Informationssysteme - Business Intelligence Technologien und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- Cheng, J. & Druzdzal, M.J.: AIS-BN: An Adaptive Importance Sampling Algorithm for Evidential Reasoning in Large Bayesian Networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, pp.155-88, 2000.
- Cordts, S.; Blakowski, G. & Brosius, G.: *Datenbanken für Wirtschaftsinformatiker - Nach dem aktuellen Standard SQL:2008*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Daum, A.; Greife, W. & Przywara, R.: *BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 2010.
- Davenport, T. & Prusak, L.: *Wenn Ihr Unternehmen wüsste, was es alles weiß.: das Praxisbuch zum Wissensmanagement*. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1998.
- Dengel, A.: *Semantische Technologien: Grundlagen – Konzepte – Anwendungen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2012.
- Denkena, B.: *Make-it - Maschinenzustandsbasierte Verfügbarkeitsdienstleistungen für hochproduktive Fertigungsanlagen: Abschlußbericht, Laufzeit: 01.03.2007 - 30.06.2010*. Hannover: PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2010.
- Denkena, B.; Blümel, P. & Röbbing, J.: Den Maschinenzustand im Fokus \* - Instandhaltung von Werkzeugmaschinen unter Verwendung von Zustandsüberwachungssystemen. *WT Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag*, pp.470-78, 2009.
- Dienst, S.: *Einsatz von Fusionstechniken für graphische Methoden zur wissensbasierten Verarbeitung von Produktnutzungsinformationen*. Universität Siegen, 2009.
- Dienst, S.; Ansari, F. & Fathi, M.: Integrated System for Analyzing Maintenance Records in Product Improvement. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Springer); M.Nr.: JAMT-D-14-00232R1* (akzeptiert 08/2014)
- Dienst, S.; Ansari, F.; Holland, A. & Fathi, M.: Applying Fusion Techniques to Graphical Methods for Knowledge Based Processing Of Product Use Information. In *2nd International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2010)*. Valencia, Spain, SciTePress, 2010.
- Dienst, S.; Ansari, F.; Holland, A. & Fathi, M.: Necessity of Using Dynamic Bayesian Networks for Feedback Analysis into Product Development. In *In: 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC 2010)*. Istanbul, Türkei, IEEE Press, 2010.

- Dienst, S.; Fathi, M.; Abramovici, M. & Lindner, A.: Development of a knowledge-based Feedback Assistance System of Product Use Information for Product Improvement. *International Journal of Product Development (Inderscience)*. (2013 akzeptiert).
- Dienst, S.; Fathi, M.; Abramovici, M. & Lindner, A.: A Conceptual Data Management Model of a Feedback Assistance System to support Product Improvement. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC 2011)*. Anchorage, Alaska, 2011.
- Dienst, S.; Fathi, M.; Holland, A.; Abramovici, M. & Lindner, A.: Nutzungs-Szenarien eines wissensbasierten Assistenzsystems zur Entscheidungsunterstützung in der Produktverbesserung. In *6th Conference on Professional Knowledge Management: From Knowledge to Action*. Innsbruck, Austria, 2010. Lecture Notes in Informatics (Editor Ronald Maier), Vol. P-182, Gesellschaft für Informatik, Bonn, Germany, 2011, ISBN 978-3-88579-276-5, 2010.
- Dienst, S.; Uhr, P.; Klahold, A.; Fathi, M.; Lindner, A.; Abramovici, M.: Concept for Improving Industrial Goods via Contextual Knowledge Provision. In *Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologies (IKnow2012)*. Graz, Austria, 2012.
- Dillon, S., Buchanan, J. & Corner, J.: A Proposed Framework of Descriptive Decision Making Theories. *Icfaian Journal of Management Research*, pp.65-74, 2005.
- DIN 25424 Teil 1: Fehlerbaumanalyse. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1981.
- DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- DIN 60300: Zuverlässigkeitsmanagement Teil 3 - 3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.
- DIN ISO 17359: Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- Directive, C., 1985. Council Directive 85/374/EEC of 25 July 1985 on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States concerning liability for defective products. Online: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/consumers/consumer\\_safety/l32012\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/consumers/consumer_safety/l32012_en.htm) (Zugriff: Juni, 2013)
- Eckerson, W.: *Performance Dashboards: Measuring, Monitoring, and Managaing your Business*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- Eckstein, S.: *Informationsmanagement in der Systembiologie - Datenbanken, Integ-ration, Modellierung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- Eco, U.: *Einführung in die Semiotik*. Stuttgart: UTB, 2002.
- Edler, A.: *Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service*. Berlin: Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, 2001.
-

- Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.
- Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A. & Lindemann, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren - Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5th ed. München, Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- Eigner, M. & Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management (VDI-Buch)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Eisenführer, F., Weber, M. & Langer, T.: *Rationales Entscheiden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Ertel, W.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz - Eine praxisorientierte Einführung*. 3rd ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2013.
- Evelson, B. & Hammond, J.S.: *The Forrester Wave™: Open Source. Business Intelligence (BI)*. Forrester Research, Inc. Reproduction Prohibited, 2010.
- Farkisch, K.: *Data-Warehouse-Systeme kompakt - Aufbau, Architektur, Grundfunktionen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- Feinberg, D. & Beyer, M.: *Magic Quadrant for Data Warehouse Database Management Systems*. Gartner RAS Core Research Note G00173535, 2010.
- Feldhusen, J. & Gebhardt, B.: *Product Lifecycle Management für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Ferreiro, S.; Sierra, B.; Irigoien, I. & Gorritxategi, E.: A Bayesian network for burr detection in the drilling process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010.
- Figueira, J.; Greco, S. & Ehrgott, M.: Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys. *International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 78, 2005*.
- Finger, P. & Zeppenfeld, K.: *SOA und WebServices*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Frohs, M.: *Recommender Systeme für produktbegleitende Dienstleistungen – Konzeption und empirische Anforderungen*. Hamburg: Verlag Dr. Konvac, 2010.
- Fung, R. & Chang, K.C.: Weighing and Integrating Evidence for Stochastic Simulation in Bayesian Networks. In Elsevier, ed. *Proceedings of the Fifth Conference on Uncertainly Artificial Intelligence (UAI 89)*. New York, 1989.

- Fung, R.M. & Favero, B.D.: Backward Simulation in Bayesian Networks. *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 94)*, pp.227-34, 1994.
- Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R. & Vlissides, J.: *Entwurfsmuster*. 6th ed. München: Addison-Wesley, 2011.
- Gluchowski, P.; Gabriel, R. & Dittmar, C.: *Management Support Systeme und Business Intelligence - Computergestützte Informationssysteme für Fach- und Führungskräfte*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Gluchowski, P.; Gabriel, R. & Pastwa, A.: *Data Warehouse & Data Mining*. Herdecke, Witten: W3L GmbH, 2009.
- Goeckede, B.: What would you decide on? Decision tasks in economic classes at business schools – a didactical analysis with regard to self-directed learning. *Journal of Social Science Education: JSSE 2-2004, ISSN 1618-5293*, 2004.
- Goeken, M.: *Entwicklung von Data-Warehouse-Systemen. Anforderungsmanagement, Modellierung, Implementierung*. Wiesbaden: Universitäts-Verlag I GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- Golfarelli, M.: Open Source BI Platforms: a Functional and Architectural Comparison. In *11th International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK 2009)*. Lintz, Österreich, 2009.
- Götze, U.: *Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Gresse, C.: *Wissensmanagement im Technologietransfer*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Grob, H.L. & Bensberg, F.: *Das Data-Mining-Konzept*. Münster: Institut für Wirtschaftsinformatik der westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 1999.
- Gronau, N.: *Wissen prozessorientiert managen - Methoden und Werkzeuge für die Nutzung des Wettbewerbsfaktors Wissen im Unternehmen*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2006.
- Grote, K.-H. & Feldhusen, J.,: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 23. Ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Grundfos: *Hilge Maxa / Maxana*. Grundfos Food Beverage Pharma, 2010.
- Gülich, J.F.: *Kreiselpumpen- Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Hahn, A.; Häusler, S. & Austing, S.: *Quantitatives Entwicklungsmanagement: Modellbasierte Analyse von Produktentwicklungsprozessen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- Haun, M.: *Handbuch Robotik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
-

- Haustein, H.-D.: *Prognoseverfahren*. Die Wirtschaft, 1970.
- Heindorf, V.: *Der Einsatz moderner Informationstechnologien in der Automobilproduktentwicklung - Produktivitätspotenziale und Systemkomplementaritäten*. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- Helbig, H.: *Wissensverarbeitung und die Semantik der natürlichen Sprache - Wissensrepräsentation mit MultiNet*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Held, M. & Klose, I., 2007: *Business Intelligence mit Pentaho*. Online: <http://www.heise.de/open/artikel/Business-Intelligence-mit-Pentaho-222177.html> (Zugriff: März 2013).
- Helmis, S. & Hollmann, R.: *Webbasierte Datenintegration. Ansätze zur Messung und Sicherung der Informationsqualität in heterogenen Datenbeständen unter Verwendung eines vollständig webbasierten Werkzeuges*. 1st ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Henrion, M.: Propagation of uncertainty in BN by probabilistic logic sampling. *Uncertainty in Artificial Intelligence 2 (Elsevier)*, pp.149-63, 1988.
- Herrmann, C.: *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Hesse, S. & Schnell, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- Hippner, H.; Hubrich, B. & Wilde, K.D.: *Grundlagen des CRM - Strategie, Geschäftsprozesse und IT-Unterstützung*. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Holzbaur, U.: *Entwicklungsmanagement - Mit hervorragenden zum Markterfolg*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- Hugin, 2012. *HUGIN EXPERT A/S*. Online: <http://www.hugin.com/> (Zugriff: Mai, 2014)
- Hwang, C.L. & Yoon, K.: *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications - A State-of-the-Art Survey*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1981.
- ICS, 2013. *ICS Mobile Lösungen*. Online: <http://www.ics-ident.de/mobile-loesungen/branchen/instandhaltung.html> (Zugriff: Juli 2013)
- IKTD, 2013. *Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Universität Stuttgart*. Online: <http://www.iktd.uni-stuttgart.de> (Zugriff: Juli 2013).
- Inmon, W.: *Building the Data Warehouse*. New York, 2002.

- IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruher Institut für Technologie (KIT): *IN<sup>2</sup> - Von der Information zur Innovation*. 2012. Online: <http://www.in2-projekt.de/2.html> (Zugriff: Juli 2013).
- Isermann, R.: *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- ITCPG - IT Policy Compliance Group: *What Color is Your Information Risk Today?* Research Report. USA, 2010. Online: <http://www.itpolicycompliance.com/> (Zugriff: Mai 2013).
- Jarosch, H.: *Grundkurs Datenbankentwurf*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- Jaspers, W. & Fischer, G.: *Wissensmanagement heute*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2008.
- Jaspersoft Cooperation, 2013. *Jaspersoft the intelligence inside*. Online: <http://www.jaspersoft.com/> (Zugriff: Mai 2014).
- Jensen, F.V.: *Bayesian networks and decision graphs*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- Jensen, F.V. & Nielsen, T.: *Bayesian Networks and Decision Graphs. Statistics for Engineering and Information Science*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2007.
- Jiang, X. & Cooper, C.F.: A real-time temporal Bayesian architecture for event surveillance and its application to patient-specific multiple disease outbreak detection. *Data Min Knowl disc* 20:328-360, 2010.
- Johnson, S.: *Integrated Bayesian Networks frameworks for modelling ecological issues*. Queensland: University of Technology, 2009.
- Jordan, M.: *Learning in Graphical Models*. Cambridge: MIT Press, 1999.
- Karagiannis, D. & Rieger, B.: *Herausforderungen in der Wirtschaftsinformatik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- Kemper, H.; Mehanna, W. & Unger, C.: *Business Intelligence Grundlagen. Eine Einführung in die IT-basierte Managementunterstützung*. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- Keuper, F. & Neumann, F.: *Wissens- und Informationsmanagement - Strategien, Organisation und Prozesse*. 1st ed. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Kimball, R. & Ross, M.: *The Data Warehouse Toolkit. The Complete Guide to Dimension Modeling*. New York, 2002.
- Kirschner, R.: *Aktive Kundeneinbindung in Innovationsnetzwerke*, 2011. Online: <http://www.akinet.eu/> (Zugriff: Mai 2014).
- Koski, T. & Noble, J.M.: *Bayesian Networks: An Introduction*. UK: John Wiley & Sons, 2009.
-



- Kotler, P., Armstrong, G., Saunders, J. & Wong, V.: *Grundlagen des Marketing*. 5th ed. München, Deutschland: Pearson Studium, 2011.
- Kropp, S. & Dünnebacke, D.: Mobile Solutions in der Instandhaltung. *Unternehmen der Zukunft*, pp.54-57, 2010.
- Kruse, R.; Borgelt, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Ruß, G.; Steinbrecher, M.: *Computational Intelligence - Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze*. 1st ed. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag |Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Kuntze, D.: *Untersuchung von Clustering-Algorithmen für die Kullback-Leibler-Divergenz..* Universität Paderborn, 2007.
- Laier, R. *Value Reporting - Analyse von Relevanz und Qualität der wertorientierten Berichterstattung von DAX-30 Unternehmen*. 1st ed. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Lassmann, W. (Hrsg.):*Wirtschaftsinformatik. Nachschlagewerk für Studium und Praxis*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr.Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- Laux, H.; Gillenkirch, R.M.; Schenk-Mathes & H.Y.: *Entscheidungstheorie*. 8th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- Lehner, F.: *Wissensmanagement – Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012.
- Lindemann, U.: *Zyklusmanagement von Innovationsprozessen – verzahnte Entwicklung von Leistungsbündeln auf Basis technischer Produkte, 2008*. Online: <http://www.sfb768.tum.de> (Zugriff: Januar, 2014).
- Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Lindemann, U.; Meiwald, T.; Petermann, M. & Schenkl, S.: *Know-how-Schutz im Wettbewerb - Gegen Produktpiraterie und unerwünschten Wissenstransfer*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Loboda, T.D. & Voortman, M., 2012. *GeNie & Smile*. Online: <http://genie.sis.pitt.edu/> (Zugriff: Januar, 2014).
- Loudon, K.C., Loudon, J.P. & Schoder, D.: *Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung*. Pearson Studium, 2009.
- Lunze, J.: *Künstliche Intelligenz für Ingenieure - Band 2: Technische Anwendungen*. München: R. Oldenburger Verlag GmbH, 1995.
- Manhart, K.: BI-Tools und Suiten im Test - Business Intelligence für Geizhalse. *CIO*, 08 September, 2009.
-

- Matyas, K.: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. *Industrie Management*, pp.13-16, 2002.
- Maurer, M., 2012. *Technische Universität München - Fakultät für Maschinenwesen - Lehrstuhl für Produktentwicklung*. Online: <http://www.pe.mw.tum.de/forschung/projekte/wissenstransfer> (Zugriff: Januar, 2014).
- Meier, H.: *Ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen (VeraPro)*. Aachen: Apprimus Verlag, ISBN: 978-3-940565-99-0, 2009.
- Meixner, O. & Haas, R.: *Wissensmanagement und Entscheidungstheorie*. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandel AG, 2010.
- Melancon, G.; Dutour, I. & Bousque-Melou, G.: *Random Generation of Dags for Graph Drawing*. Technischer Bericht INS-R0005. Dutch ResearchCenter for Mathematical and Computer Science (CWI), 2000.
- Mertens, P.: *Expertensysteme in der Produktion*. München: Oldenbourg, 1990.
- Mertens, P. & Meier, M.C.: *Integrierte Informationsverarbeitung 2*. 10th ed. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Mertens, K. & Seidel, H.: *Wissensmanagement im Mittelstand: Grundlagen – Lösungen – Praxisbeispiele*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Mescheder, B. & Sallach, C.: *Wettbewerbsvorteile durch Wissen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Michel, S. & Oberholzer Michel, K.: *Marketing: Eine praxisorientierte Einführung mit zahlreichen Beispielen*. 5th ed. Zürich: Compendio Bildungsmedien AG, 2011.
- Molina, J.L.; Bromley, J.; Garcia-Arostegui, J.L.; Sullivan, C.; Benavente, J.: Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using Object-Oriented Bayesian Networks. *Environmental Modelling and Software*, pp.383-97, 2010.
- Moseng, B., 2008. *PROMISE - PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT AND INFORMATION TRACKING USING SMART EMBEDDED SYSTEMS*. Online: <http://www.promise.no/> (Zugriff, November, 2013)
- Müller, K.-R.: *IT-Sicherheit mit System: Integratives IT-Sicherheits-, Kontinuitäts- und Risikomanagement- Sicherheitspyramide - Standards und Practices - SOA und Softwareentwicklung*. 4th ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | SpringerFachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Müller, R.M. & Lenz, H.J.: *Business Intelligence*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- Munzinger, C. & Schopp, M.: *Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung (OPTILAST)*. Aachen: Apprimus Verlag, 2009.
-

- Murphy, K.: *Dynamic Bayesian Networks: Representation, inference and Learning*. Phd Thesis. UC Berkeley: Computer Science Division, 2002.
- Neubach, M.: *Wissensbasierte Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung im Rahmen einer PLM-Lösung*. Dissertation. Bochum, 2010.
- Neugebauer, R.: *VIPRO - Vorausschauende zustandsabhängige Instandhaltung an Produktionsmaschinen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2011.
- Noske, H. & Kalogerakis, C.: Design-to-Life-Cycle-Cost bei Investitionsgütern am Beispiel von Werkzeugmaschinen. In Schweiger, S. (Hrsg.): *Lebenszykluskosten optimieren - Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. Wiesbaden : Gabler | GWV Fachverlage GmbH. pp.135-52, 2009.
- Oracle, 2011. *MySQL Workbench SE version 5.2 and the MySQL Workbench OSS version 5.2*. Online: <http://www.mysql.de/products/workbench/resources.html> (Zugriff: November, 2013).
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. & Grote, K.H.: *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- Paul, G. & Paul, R.: Engineering Data Management and Product Data Management: Roles and Prospects. In *International Scientific Conference Computer Science*, 2008.
- Pawellek, G.: *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik: Vorgehensweisen, Methoden, Tools*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- Pearl, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, 1988.
- Pehnt, M.: *Energieeffizienz*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Pentaho Corporation, 2013. Online: [http://www.pentaho.com/products/bi\\_suite/](http://www.pentaho.com/products/bi_suite/) (Zugriff: November, 2013).
- Peters, M.L. & Zelewski, S.: TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. *WiSt Heft, Vahlen Verlag, München*, Januar, 2007.
- Piazza, F.: *Data Mining im Personalmanagement - Eine Analyse des Einsatzpotenzials zur Entscheidungsunterstützung*. Wiesbaden: Gabier Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- Ponn, J. & Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungslösungen*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- Pourret, O., Naim, P. & Marcot, B.: *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*. West Sussex; England: John Wiley & Sons, 2008.

- Prevedello, L.M.; Andriole, K.P.; Hanson, R.; Kelly, P.; Khorasani, R.: Business Intelligence Tools for Radiology: Creating a Prototype Model Using Open-Source Tools. *Journal of Digital Imaging, Vol 23, No 2, 2 April*. pp.133-41, 2010.
- Prinzie, A. & Van den Poel, D.: Modeling complex longitudinal consumer behavior with Dynamic Bayesian networks: an Acquisition Pattern Analysis application. *Journal of Intelligent Information System, Vol. 35, June*. pp.283-304, 2011.
- Probst, G., Raub, S. & Romhardt, K.: *Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. 7th ed. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2012.
- Pumacy Technologies, A., 2013. *Pumacy Technologies AG*. Online: [http://www.pumacy.de/aktuelles/wissensschatz\\_produktlebenszyklus.html](http://www.pumacy.de/aktuelles/wissensschatz_produktlebenszyklus.html) (Zugriff: März, 2013).
- Raibold, H.: *Pentaho kompakt*. Saarbrücken: Brain-Media.de, 2010.
- Reichel, J., Müller, G. & Mandelartz, J.: *Betriebliche Instandhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Reimann, S.: *Wissens- und Informationsmanagement*. 1st ed. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- REpower, S.A., 2010. *EUREKA - doing Business through technologie*. Online: <http://www.eurekanetwork.org/project/-/id/7220> (Zugriff: März, 2013).
- Richter, M.; Dietz, T.; Fischer, D.; Fränzel, A.; Freitag, H.; Knochenhauer, H.-P.; Schwalm, H.; Seidel, A.; Uhlmann, M.: *Produkt-Beschreibung zu: Verfügbarkeit von höchstpräzisen mechatronischen Montageanlagen (VerMont)*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsver ISBN-10: 3940565962, 2010.
- Roddeck, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Teubner, 2006.
- Roth, J.: *Mobile Computing*. 2nd ed. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2005.
- Rudolph, A.: *Data Mining Verfahren*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2008.
- Runkler, T.A.: *Data Mining - Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- Russell, S. & Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd ed. USA: Prentice Hall International, 2012.
- Salini, S. & Kenett, R.S.: Bayesian Networks of Customer Satisfaction Survey Data. *Journal of Applied Statistics, Volume 36, Issue 11, 11 November*. pp.1177-89, 2009.
- Sauter, J.: *PLM im Wandel - Trends und Technologien für die Zukunft*. Swiss PLM-Forum. Rapperswil, Schweiz: BCT Technologie AG, 2011.
-

- Sawa Pumpen, 2013. *Huckauf Ingenieure*. Online: [http://www.huckauf.de/PDF/sawa/Sawa\\_Prospekt\\_D.pdf](http://www.huckauf.de/PDF/sawa/Sawa_Prospekt_D.pdf) (Zugriff: März, 2014).
- Schäppi, B.; Andreasen, M.M.; Kirchgeorg, M. & Radermacher, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2005.
- Schaumann, G. & Schmitz, K.W.: *Kraft-Wärme-Kopplung*. 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Scheer, A.-M.; Boczanski, M.; Muth, M.; Schmitz, W.-G.; Segelbacher, U.: *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- Schmidt, O.: *Konzeptionierung und Realisierung einer prototypischen mobilen Softwarelösung zur zeitnahen, effizienten Aquisition und Rückführung von objektiven Servicedaten im Kontext des WiRPro Projektes*. Diplomarbeit ed. Siegen: Universität Siegen, 2011.
- Schmidt-Volkmar, P.: *Betriebswirtschaftliche Analyse auf operationalen Daten*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- Schnek, M.: *Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- Schön, D.: *Planung und Reporting im Mittelstand - Grundlagen, Business Intelligence und Mobile Computing*. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012.
- Schöttner: *Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie – Prinzipien, Konzepte, Strategien*. Leipzig: Fackler, 1999.
- Schröder, W.: *Ganzheitliches Instandhaltungsmanagement: Aufbau, Ausgestaltung und Bewertung*. 1st ed. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- Schuh, G.; Franzkoch, B.; Kupke, D. & Wesch, C.: Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung: Stellhebel zur Steigerung der Verfügbarkeit in produzierenden Unternehmen (Verstand). *wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG*, pp.538-43, 2007.
- Schulte, S.: *Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit*. Aachen: Shaker Verlag, 2007.
- Schütz, H.: *Strategische Kostenplanung für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen- Grundlagen, Konzepte, Methoden*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2008.
- Schweiger, S.: *Lebenszykluskosten optimieren: Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Seliger, G., Gegusch, R., Abramovici, M. & Neubach, M.: Knowledge-Based Feedback of IPS<sup>2</sup> Use Information. *Proceedings of the IEEE Information Reuse and Integration, 2010*.
-

- Seliger, G.; Gegusch, R.; Gestrich, K.: Software Agents for Automated Knowledge Generation in IPS<sup>2</sup>. In *Proceedings of the 2nd CIRP IPS<sup>2</sup> Conference*. Linköping, 2010.
- Sendler, U.: *Das PLM Kompendium - Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- Shi, D. & You, J.: Adaptive dynamic probabilistic networks for distributed uncertainty processing. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, pp.269-84, 2007.
- Soukup, C.: *Wissen zwischen Steuerung und Selbstorganisation*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2001.
- Sowa, A.: *Metriken – der Schlüssel zum erfolgreichen Security und Compliance Monitoring*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Speck-Pumpen, 2013. *Huckauf Ingenieure*. Online: <http://www.huckauf.de/> (Zugriff: November, 2013).
- Staud, J.L.: *Datenmodellierung und Datenbankentwurf: Ein Vergleich aktueller Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- Stewart, T.: A Critical Survey on the Status of Multiple Criteria Decision Making Theory and Praxis. *Omega International Journal of Management Science* 20 (5/6), pp.S. 569-586, 1992.
- Stiefel, P.: *Eine dezentrale Informations- und Kollaborationsarchitektur für die unternehmensübergreifende Produktentwicklung*. 1st ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Stöckert, H.: *Fehlervermeidung an Schnittstellen-Prozessen der verteilten Produktentwicklung*. Berlin: TU Berlin, 2011.
- Strohmeier, S.: *Informationssysteme im Personalmanagement: Architektur – Funktionalität – Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- Strunz, M.: *Instandhaltung: Grundlagen – Strategien – Werkstätten*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Sturm, A. & Förster, R.: *Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1990.
- Susnik, J.; Molina, J.L.; Vamvakieridou-Lyroudia, L.; Savic, D.; Kapelan, Z.: Comparative Analysis of System Dynamics and Object-Oriented Bayesian Networks Modelling for Water System Management. *Springer Science + Business Media Dordrecht*, pp.819-41, 2012.
- Taschner, A.: *Management Reporting - Erfolgsfaktor internes Berichtswesen*. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2013.
-

- Thomas, O., Loos, P. & Nüttgens, M.: *Hybride Wertschöpfung - Mobile Anwendungssysteme für effiziente Dienstleistungsprozesse im technischen Kundendienst*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Thompson, J.R.: *Simulation – A Modeler’s Approach*. Kanada: John Wiley & Sons, 2000.
- Uhr, P.; Dienst, S.; Klahold, A. & Fathi, M.: Kontextbasierte Bereitstellung von Textdokumenten im Produktverbesserungsprozess\*. *Journal wt Werkstattstechnik online*, 7/8 2012, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, , Juli/ August. pp.528-534, 2012.
- VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- VDI 2219: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- VDI 2519: *VDI-Richtlinie 2519 - Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften*. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- VDI 3432: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Zeiterfassung und Berechnung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- VDI 5610 Teil 1: *Wissensmanagement im Engineering – Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008.
- VDMA-Einheitsblatt 34160: *Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen*. Frankfurt, 2006.
- Viessmann Werke GmbH & Co. KG, 2012. *Viessmann climate of innovation*. Online: [www.viessmann.com](http://www.viessmann.com) (Zugriff: August, 2013).
- Viessmann: *Vitobloc 200, Blockheizkraftwerk für Erdgasbetrieb*. Technische Beschreibung. Landsberg (Deutschland): Viessmann Group ESS Energie Systeme & Service GmbH, 2009.
- Walther, G.: *Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke*. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- Wehner, T.; Voit, E. & Lüthy, W.: *Wissensmanagement Praxis: Einführung, Handlungsfelder und Fallbeispiele*. Zürich: Vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 2002.
- Wenger, W.: *Multikriterielle Tourenplanung*. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- Wesche, W.: *Radiale Kreiselpumpen- Berechnung und Konstruktion der hydrodynamischen Komponenten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
-

- Wessler, M.: *Entscheidungstheorie - Von der klassischen Spieltheorie zur Anwendung kooperativer Konzepte*. Wiesbaden : Gabler Verlag | Springer Fachmedien, 2012.
- Willke, H.: *Systemisches Wissensmanagement*. Stuttgart: Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft mbH, 2001.
- Wilo, 2013. *WILO SE*. Online: <http://productfinder.wilo.com/de/DE/start> (Zugriff: September 2013).
- Winkelmann, P.: *Marketing und Vertrieb: Fundamente für die Marktorientierte Unternehmensführung*. 6th ed. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2008.
- Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D. & Voßiek, J.: *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung*. 20th ed. Vieweg+Teubner Verlag |Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Witte, R. & Mülle, J.: *Text Mining: Wissensgewinnung aus natürlichsprachigen Dokumenten*. Karlsruhe: Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe, ISSN: 1432-7864. , 2006.
- Witten, I.H.; Frank, E. & Hall, M.A.: *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Third Edition)*. Burlington, USA: Morgan Kaufmann, 2011.
- Wosnitza, F. & Hilgers, H.G.: *Energieeffizienz und Energiemanagement - Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, 2012.
- Yuan, C. & Druzdzal, M.J.: An Importance Sampling Algorithm Based on Evidence Prepropagation. In Kaufmann, M., ed. *Proceedings of the 19th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-03)*, 2003.
- Zangemeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. München: Techn. Univ. Berlin, 1976.
- Zeh, T.: Data Warehousing als Organisationskonzept des Datenmanagements. Eine kritische Betrachtung der DW-Definition von Inmon. *Information Management and Consulting Informatik - Forschung und Entwicklung, Springer, Band 18, Heft 1*, August, 2003.
- Zimmermann, H.J. & Gutsche, L.: *Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991.



## 8.5 Eigene Publikationen im Rahmen dieser Arbeit

- **Dienst, S.;** Ansari, F. & Fathi, M.: Integrated System for Analyzing Maintenance Records in Product Improvement. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Springer)*; M.Nr.: JAMT-D-14-00232R1 (akzeptiert 08/2014)
- **Dienst, S.;** Fathi, M.; Abramovici, M. und Lindner, A.: Development of a knowledge-based Feedback Assistance System of Product Use Information for Product Improvement. In *International Journal of Product Development (Inderscience)*, Vol. 19 No. 4, S. 191-210, 2014.
- Abramovici, M.; Lindner, A.; **Dienst, S.** und Fathi, M.: Predicting the behavior of solution alternatives within product improvement processes. In *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design 2013 (ICED13)*, 2013.
- Uhr, P.; **Dienst, S.;** Klahold, A. und Fathi, M.: Kontextbasierte Bereitstellung von Textdokumenten im Produktverbesserungsprozess\*. *Journal wt Werkstattstechnik online*, Juli/ August, S.528-534, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2012
- **Dienst, S.;** Uhr, P.; Klahold, A.; Fathi, M.; Lindner, A. und Abramovici, M.: Concept for Improving Industrial Goods via Contextual Knowledge Provision. In *Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologies (IKnow2012)*. Graz, Austria, 2012.
- Abramovici, M.; Lindner, A. und **Dienst, S.:** Use Case of providing Decision Support for Product Developers in Product Improvement Processes. In *5th Int. Conference on Integrated Systems, Design and Technology (ISDT)*. Mallorca, 2012.
- Ansari, F.; **Dienst, S.;** Uhr, P. und Fathi, M.: Using Data Analysis for Discovering Improvement Potentials in Production Process. In *Joint IEEE International Conference on Industrial Electronics (IEEE ICIT 2011)*. Auburn, Alabama, USA, 2011.
- **Dienst, S.;** Fathi, M.; Abramovici, M. und Lindner, A.: A Conceptual Data Management Model of a Feedback Assistance System to support Product Improvement. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC 2011)*. Anchorage, Alaska, 2011.
- Abramovici, M.; Lindner, A.; **Dienst, S.** und Fathi, M.: Decision support for improving the design of hydraulic systems by leading feedback into product development. In *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design 2011 (ICED11)*. Denmark Technical University, Kopenhagen, Denmark, 2011.
- **Dienst, S.;** Fathi, M.; Abramovici, M. und Lindner, A.: Nutzungs-Szenarien eines wissensbasierten Assistenzsystems zur Entscheidungsunterstützung in der Produktverbesserung. In *6th Conference on Professional Knowledge Management: From Knowledge to Action*. Innsbruck, Austria, 2010. Lecture Notes in Informatics

(Editor Ronald Maier), Vol. P-182, Gesellschaft für Informatik, Bonn, Germany, 2011, ISBN 978-3-88579-276-5.

- **Dienst, S.**; Ansari, F.; Holland, A. und Fathi, M., 2010. Necessity of Using Dynamic Bayesian Networks for Feedback Analysis into Product Development. In *In: 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC 2010)*. Istanbul, Türkei, 2010. IEEE Press.
- **Dienst, S.**; Ansari, F.; Holland, A. und Fathi, M.: Applying Fusion Techniques to Graphical Methods for Knowledge Based Processing Of Product Use Information. In *2nd International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2010)*. Valencia, Spain, 2010. SciTePress.