

Nutzungs-Szenarien eines wissensbasierten Assistenzsystems zur Entscheidungsunterstützung in der Produktverbesserung

Madjid Fathi¹, Michael Abramovici², Alexander Holland¹, Andreas Lindner², Susanne Dienst¹

¹Universität Siegen
Institut für Wissensbasierte Systeme und Wissensmanagement
57068 Siegen
{fathi, alex, dienst}@informatik.uni-siegen.de

²Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Maschinenbau Maschinenbauinformatik
44801 Bochum
{michael.abramovici, andreas.lindner}@itm.rub.de

Abstract: Während des Produktlebenszyklus einer Produktionsmaschine werden Feedbackdaten aus der Produktnutzungsphase für die Produktentwicklung der nächsten Generation durch wissensbasierte Analyse und Rückführung an ein Produkt Lebenszyklus Management (PLM) System genutzt. Bei bisherigen PLM-Systemen werden die Informationen aus der Produktentwicklung gesammelt und analysiert, die Informationen aus der Produktnutzungsphase werden nur rudimentär im PLM-System verwaltet. Daher wird als Erweiterung ein Assistenzsystem zur Verwaltung der Informationen implementiert. Die in diesem Beitrag vorgestellten Nutzungs-Szenarien beschreiben die umzusetzenden Funktionalitäten des Assistenzsystems. Die für eine Auswertung notwendigen Feedbackdaten (z.B. Condition Monitoring Daten) werden von mehreren Produktinstanzen erfasst und innerhalb des Assistenzsystems bereitgestellt. Dem Produktentwickler stehen die wissensbasierten Funktionen des Assistenzsystems wie Aggregation oder Simulation durch What-If-Analyse zur Verfügung. Aus den gesammelten Produktnutzungsinformationen lassen sich so durch die Verwendung graphischer Modelle generell (gültige) Produktverbesserungen und -Potentiale ableiten, die für eine ganze Produktgeneration Gültigkeit haben, wodurch der Entwickler bei den Entscheidungen innerhalb der Verbesserung unterstützt wird.

1 Einleitung

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Kooperationsprojekts, ist es das Ziel Feedbackdaten aus der Produktnutzungsphase in die Produktverbesserung der nächsten Produktgeneration zu integrieren [Ab08]. Mit Hilfe eines wissensbasierten Assistenzsystems werden dem Produktentwickler Feedbackdaten (wie Sensordaten) zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt, um den Produktverbesserungsprozess [Eh07] der nächsten Produktgeneration zur Steigerung der Verfügbarkeit der Produktgeneration $n+1$ zu unterstützen.

Die Informationssammlung für den Entscheidungsprozess zur Produktverbesserung findet in der Produktnutzungsphase von Maschinen (wie Rotationsspindel, Heizung) statt. Dort werden objektive Produktnutzungsinformationen (PNI) erfasst, wobei es sich um Condition Monitoring (CM)- Daten (z.B. Sensordaten), Umgebungsdaten oder Wartungsereignisse handelt, d. h. Daten ohne subjektive Bewertung durch z.B. den Kunden [Sc07]. Innerhalb des Projekts liegt der Fokus auf der Verbesserung von Produkten bzw. Komponenten davon, denn bei der Verbesserung werden im Gegensatz zur Neuentwicklung keine neuen Hauptfunktionsprinzipien entwickelt, sondern vorhandene Prinzipien, von denen PNI vorliegen, verbessert.

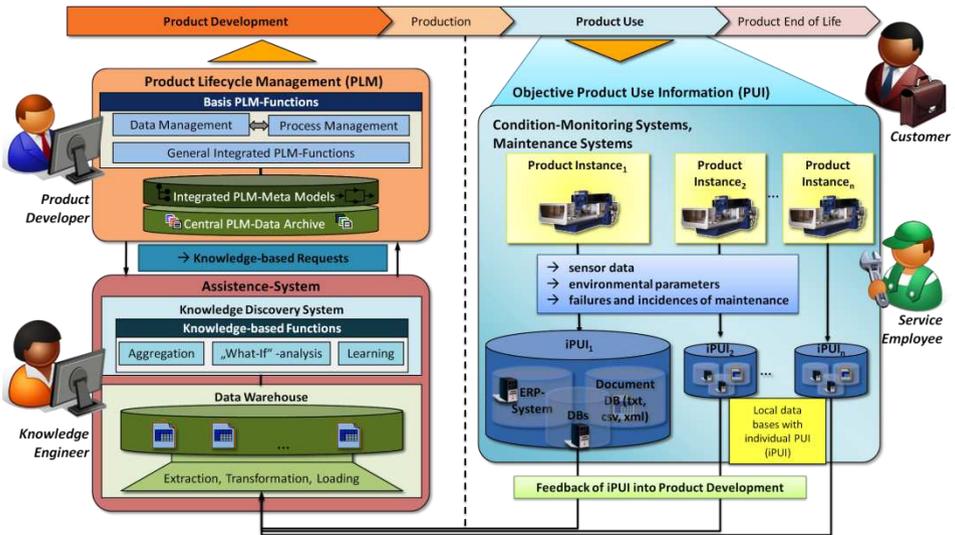


Abbildung 1: Assistenzsystem zur Unterstützung bei der kollaborativen Produktverbesserung

Die PNI bilden die Basis des wissensbasierten Assistenzsystems, das durch eine systemspezifische Schnittstelle an ein PLM-System gekoppelt ist. PLM beschreibt einen integrierten Ansatz bestehend aus einem konsistenten Satz an Methoden, Modellen und IT-Werkzeugen zum Management produktbezogener Engineering-Daten, -Prozesse und -Anwendungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus [Sc05]. Dieser Zyklus kann abgebildet sein innerhalb eines Industrieunternehmens oder in Unternehmensverbänden (bestehend aus Zulieferern, Partner und Kunden) [Sc05], welcher als PLM-System in einem Unternehmen umgesetzt wird. Aus der gefilterten und verdichteten Datenbasis (wie beispielsweise die PNI einer Maschine, in der die Ausreißer bereits herausgefiltert wurden) wird zur Analyse und Visualisierung ein graphisches Modell, (z.B. ein Bayes'sches Netz [RN09]) mit Hilfe eines Lernalgorithmus als Repräsentation generiert [Di10]. Diese graphischen Modelle, die eine Verbindung aus der Wahrscheinlichkeitstheorie und der Graphentheorie sind [WJ08], können mit den Funktionen der Knowledge-Discovery Komponente, wie z.B. Aggregation (Zusammenführung mehrerer graphischer Modelle) analysiert werden.

Dadurch kann der Produktentwickler Produktverbesserungen und –Potentiale von mehreren Maschinen eines Typs ableiten. Anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilung des graphischen Modells lässt sich z.B. ablesen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls einer Heizung steigt, je niedriger der Öldruck ist.

Bei der Produktverbesserung besteht die Möglichkeit der Kollaboration mit den Entscheidungsträgern, die unterschiedliche Präferenzen haben, auf Herstellerseite, wie Produktentwickler und Wissensingenieur (WI) und den Kunden. Für den Kunden steht hierbei die Erfüllung seiner Anforderungen im Vordergrund, wohingegen der Hersteller für die Umsetzung der Anforderungen verantwortlich ist. Die Funktionen des Engineering Collaboration (z.B. Videokonferenz) werden im Funktionsumfang eines PLM-Systems abgedeckt und durch virtuelle Techniken unterstützt [ES09]. Dabei lässt sich grundsätzlich zwischen zwei Rollenbeschreibungen unterscheiden: dem Anwender und dem WI. Die Anwender sind diejenigen, die die übertragenen Informationen (z.B. wissensbasiertes Modell) die das Assistenzsystem bereitstellt, verwenden, um zu einer Lösung bei der Suche nach Produktverbesserungen zu gelangen. Die Anwender sind Produktentwickler, Kunden (die direkt über das Internet verbunden sind) und Support-Partner (Dienstleister, Servicemitarbeiter und Outsourcing-Partner). Ein WI dient als Experte für die Auswertung und Bereitstellung von Methoden zur Wissensrepräsentation [FH94], Akquise, Modellierung, etc.. Der WI ist für den gesamten Wissensaustausch-/Transfer- Prozess der PNI zuständig. Er übernimmt hierbei auch die Aufgabe als Moderator und Verbindungsstelle zwischen Kunden und Herstellern, z.B. in Bezug auf die Durchführung von Analysen zur Wissensableitung. Die Aufgaben sind unter anderem die Auswahl geeigneter Lernverfahren sowie Knowledge Discovery Tools zur Generierung eines Modells und ggf. der Aggregation mehrerer Modelle durch Fusionstechniken. Im Folgenden werden die drei Nutzungs-Szenarien (Use Cases) des wissensbasierten Assistenzsystems erläutert und in die Phasen der Produktverbesserung, in denen sie zur Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden, eingeordnet. Diese Use Cases beschreiben die Funktionalitäten des Assistenzsystems und sind damit die Grundlage des sich zurzeit in der Umsetzung befindlichen Prototyps.

2 Die Produktverbesserung als Variante der Produktneuentwicklung

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 [Ve93], [Pa07]. Es folgten zahlreiche Ausarbeitungen, die die VDI 2221 weiter konkretisierten und unterschiedliche Ansatzpunkte für eine Produktentwicklung suchten (vgl. [Pa07], [Eh07]). Ein 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 [Ve04]. Die große Stärke des V-Modells ist, dass dem Systementwurf die Systemintegration (vgl. Abbildung 2) gegenübergestellt wird, so dass zur Fehlervermeidung eine direkte Eigenschaftsabsicherung erfolgen kann.

Unabhängig von der Entwicklungsmethodik werden nach dem Anstoßen einer Produktneuentwicklung die folgenden vier Phasen einschließlich der im Folgenden aufgeführten Teilaufgaben durchlaufen (vgl. [Ve93], [Pa07], [Eh07]):

1. Analysieren: Planen der Aufgabe, Definition der Ziele, Formulierung der Anforderungen
2. Konzipieren: Ermittlung von Funktionen, Suche von Lösungsprinzipien, Erarbeitung des Konzepts
3. Entwerfen: Bestimmen der Funktionsträger, Grobgestaltung aller Module (Grobentwurf), Endgestaltung der Module (Feinentwurf)
4. 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. 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). Teilfunktionen (z.B. Abdichtung des Gehäuses) können abgeändert werden, jedoch muss hierbei die Funktionssicherheit gesteigert werden (z.B. Einbau resistenterer Dichtungen) [De03]. Für eine Verbesserungskonstruktion verringert sich somit der Konstruktionsaufwand im Vergleich zur Produktneuentwicklung dadurch, dass

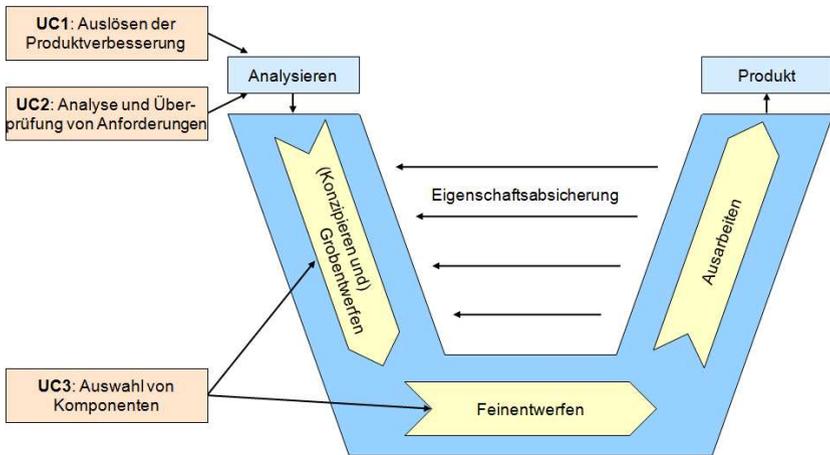
- a. die Anforderungen aus der vorhergehenden Produktgeneration bereits bekannt sind, jedoch an die veränderten Rahmenbedingungen (z.B. geänderte Kundenwünsche, neue Normen und Richtlinien) angepasst werden müssen und
- b. die Phase Konzipieren (vgl. Abbildung 2) teilweise oder ganz entfallen kann, da Funktionen und Lösungsprinzipien bereits bekannt sind und nicht neu erarbeitet werden müssen (z.B. durch die Wahl einer Radialkreiselpumpe zur Beförderung eines Mediums) [Eh07].

3 Beschreibung der Use-Cases zur Entscheidungsunterstützung in der Produktverbesserung

Informationen aus der Produktnutzung (z.B. CM-Daten, Wartungsereignisse) können eine Produktverbesserung effizient durch eine Fehlerursachenanalyse unterstützen [Ab08]. Für die Anwendung eines Assistenzsystems in der Produktverbesserung wurden für das Projekt WiRPro in Zusammenarbeit mit mehreren Industrieunternehmen die folgenden Nutzungsszenarien erstellt:

1. **UC1** - Validierung der Anforderungen der Produktgeneration n , während der Nutzung der Generation n . Nicht erfüllte Anforderungen (z.B. tatsächliche Zuverlässigkeit unter einem geforderten Grenzwert) führen zu einem Verbesserungsprozess.

2. **UC2** - Bereitstellen von Informationen über die Produktgeneration n , zur quantitativen Erfassung nicht erfüllter (z.B. Zuverlässigkeit $\leq 95\%$) und neu aufzunehmender Anforderungen (z.B. Verbot umweltschädlicher Stoffe und Materialien) und mangelhaft arbeitender Komponenten (z.B. übermäßiger Verschleiß von Dichtungen) für die Produktgeneration $n+1$.
3. **UC3** - Unterstützen des Produktentwicklers bei der Auswahl einzelner Komponenten (z.B. Dichtungen) für die Produktgeneration $n+1$ (vgl. Abbildung 2), indem die Anforderungen an das Assistenzsystem gesendet werden und das basierend auf den PNI der Vergangenheit geeignete Komponenten vorschlägt. Hierbei ist eine Unterscheidung der Komponenten nach Hersteller und Betriebsbedingungen vorgesehen.



UC: Use-Case

Abbildung 2: Einordnung der Use-Cases in den Produktverbesserungsprozess

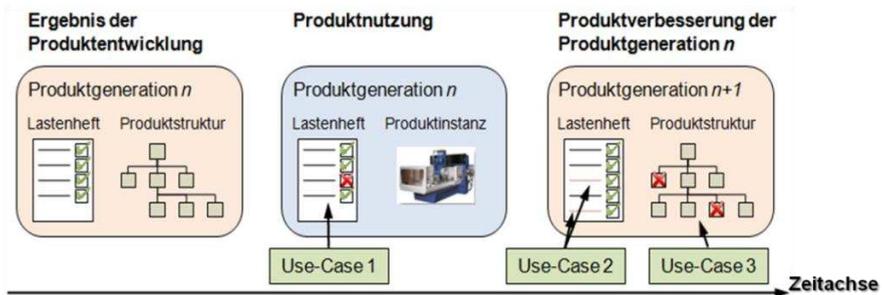


Abbildung 3: Aufgaben der Use-Cases

Use-Case 1: Auslösen der Produktverbesserung

Eine Produktverbesserung wird erforderlich, falls ein Produkt die gestellten Anforderungen nicht oder nicht mehr erfüllt (vgl. Abbildung 3). Die Gründe hierfür liegen darin, dass sich die Anforderungen von Kunden stetig weiterentwickeln oder z.B. durch neue Normen und Gesetze sich Anforderungen ändern bzw. neu hinzukommen [Eh07]. Beschrieben sind hiermit zwei Gruppen von Auslösern, solche die subjektiv (z.B. vom Kunden: „Ich brauche eine höhere Kapazität“) anstoßen und die, die auf objektiven Daten beruhen (z.B. Betriebstemperatur liegt oberhalb des geforderten Grenzwerts).

Objektive Auslöser sind die für diesen Use-Case relevanten Ausgangsdaten. Sie liegen für die Produktgeneration n in Form von Anforderungen in einem Lastenheft vor, das während der Produktnutzung bereits für die Produktgeneration $n+1$ geändert oder erweitert werden kann. Die Anforderungen müssen quantifizierbar (z.B. Zuverlässigkeit $> 95\%$) und prüfbar (z.B. Schnittstelle ist vorhanden oder nicht) sein [VE01]. Die quantifizierbaren Anforderungen können partiell direkt gemessen (z.B. Fördermenge) oder als Kombination mehrerer PNI (z.B. Wirkungsgrad) bestimmt werden.

Dies erfolgt durch die Anwendung des wissensbasierten Assistenzsystems seitens des Herstellers, in dem Zeiträume, PNI und Auswertemöglichkeiten zur Bestimmung relevanter Kennzahlen (z.B. Zuverlässigkeit, Wirkungsgrad) gewählt werden können. Die Abfragen sind vordefiniert, um eine schnelle und einfache Abfrage zu gewährleisten. Hier setzt der PE das Assistenzsystem zur Entscheidungsunterstützung ein, ob ein ausgewähltes Produkt bei erfüllen der Anforderungen direkt produziert wird oder im Falle der Nichterfüllung ist eine Produktverbesserung durchzuführen. In diesem Use-Case ist eine qualitative Auswertung ausreichend. In der folgenden Abbildung 4 sind die Prozesse des Use Cases in der Phase Analysieren dargestellt.

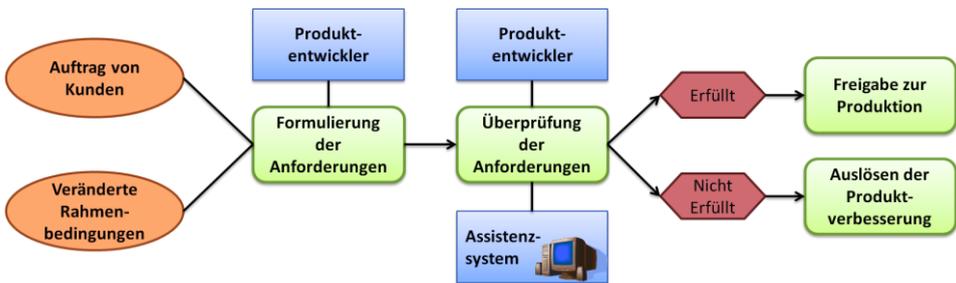


Abbildung 4: Prozesse zum Auslösen der Verbesserung innerhalb der Phase Analysieren

Use-Case 2: Analyse und Überprüfung von Anforderungen

Das Assistenzsystem unterstützt innerhalb der Produktverbesserung die Phase „Analysieren“. Es werden vorhandene Anforderungen quantitativ auf ihre Erfüllung hin überprüft (vgl. Abbildung 3), um Handlungsbedarfe zu erkennen. Nicht erfüllte Anforderungen werden geändert oder auch neue aufgenommen. In der Analysephase ist das neue Lastenheft für die Produktgeneration $n+1$ zu erstellen (vgl. Kap. 2). Dadurch, dass die Hauptfunktionen von der Produktgeneration n zur Produktgeneration $n+1$ im Rahmen einer Produktverbesserung nicht geändert werden dürfen, kann das Lastenheft der Produktgeneration n zunächst übernommen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass sich Anforderungen mittlerweile geändert haben können oder neue Anforderungen aufzunehmen sind (z.B. „Steigerung der Fördermenge um 2%“). Die neuen und geänderten Anforderungen werden durch die Anpassung der Teilfunktionen, indem z.B. ein anderes Material verwendet wird, umgesetzt.

Für die Erstellung des neuen Lastenheftes $n+1$ führt der Produktentwickler eine quantitative Bewertung der Anforderungen des bestehenden Lastenheftes n durch. Der Produktentwickler als Anwender, des im Rahmen des Projektes entwickelten Assistenzsystems, wird dadurch unterstützt, dass er Produktgenerationen und -Instanzen (PI), PNI und einen Auswertezeitraum zur Auswertung auswählen kann. Anschließend werden daraus durch unterschiedliche Knowledge Discovery Funktionen (z.B. What-If-Analysen in Bayes'sches Netz) zusätzliche Informationen zur Verbesserung bereitgestellt. Das ermöglicht dem Produktentwickler z.B. Kennzahlen zu ermitteln, die nicht unmittelbar gemessen werden können (z.B. den Wirkungsgrad) oder Regeln durch What-If-Analysen abzuleiten (z.B. IF (Umgebungstemperatur $< 10^{\circ}\text{C}$ AND Dichte des Mediums $< 1 \text{ KG/m}^3$) THEN (Wirkungsgrad $> 95\%$)).

Zur nicht intuitiven Regelableitung hat der Produktentwickler die Möglichkeit in Kollaboration mit dem Wissensingenieur wissensbasierte Verfahren anzuwenden. Durch die Auswahl der PNI in Bezug auf Produktgenerationen und -Instanzen wird der Umfang der Daten beschränkt, aus denen das wissensbasierte Modell gelernt wird. Dadurch wird die Visualisierung übersichtlicher und der Produktentwickler kann Erfahrungswissen über einzelne Produktinstanzen einfließen lassen. Eine Auswahl eines Zeitraums (z.B. die PNI der letzten 3 Monate) für die Auswertung ist nötig, da während der frühen Betriebsphase (Anlaufphase) die Ausfälle erfahrungsgemäß höher sind (aufgrund häufigerer Wartungsintervalle innerhalb der Anlaufphase) als während des späteren Betriebs [Sc09].

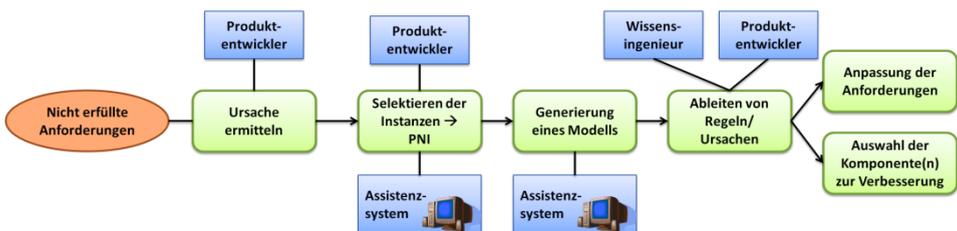


Abbildung 5: Prozesse zur Auswahl der Komponenten zur Verbesserung

Die PNI werden über Sensoren erfasst, die oft nur eine Komponente überwachen (z.B. Schwingungsmessung an einem Lager). Durch die Auswertung der PNI in BN kann der Produktentwickler direkt auf Ausfällereignisse an bekannten Komponenten schließen. Er erhält in diesem Use-Case also nicht nur Informationen zu den Anforderungen, die geändert werden müssen, sondern kann auch direkt die Komponenten identifizieren, die für die Erfüllung der neuen Anforderungen geändert werden müssen [LF06].

Use-Case 3: Auswahl von Komponenten

Während der Entwurfsphase wird dem Produktentwickler die Möglichkeit gegeben Komponenten (insbesondere Zukaufteile und Variantenteile) aus einer hierarchischen Struktur vorhandener Komponenten auszuwählen (vgl. Abbildung 3). Die Komponenten werden dafür klassifiziert (z.B. wird die Komponente „Radialkreiselpumpe“ der Kategorie „Pumpen“ zugeordnet), die nach Funktionsweise und Bauart in verschiedene Unterkategorien unterteilt wird (z.B. Radialkreiselpumpe mit Anschluss nach DIN oder kundenspezifischer Anschluss). Die Klassifikation und Auswahl von bestimmten Komponenten wird innerhalb des Assistenzsystems durch einen dialogorientierten Zugriff (Reporting) [Ga09] realisiert. 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.

Alternativ dazu wird dem Produktentwickler über eine Eingabemaske die Möglichkeit gegeben, unabhängig von Funktionsprinzip und Bauart, anhand vorgegebener Werte (z.B. bekannter Umgebungstemperatur) aus allen Instanzen (durch Verknüpfung der PNI zu den Instanzen) eine auszuwählen, die die ermittelten Anforderungen erfüllt.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Paper sind die Nutzungs-Szenarien eines wissensbasierten Assistenzsystems in der Produktverbesserung erläutert worden. Der Fokus liegt auf der Verbesserungskonstruktion, die sich als Variante der Neukonstruktion darstellen lässt. Die drei vorgestellten Nutzungs-Szenarien zeigen, in welchen Phasen der Produktverbesserung, der Produktentwickler das Assistenzsystem anwenden kann. Durch die Bereitstellung von objektiven Informationen aus der Produktnutzung wird der Produktentwickler bei der Einleitung der Verbesserung, der Überprüfung der Anforderungen und bei der Auswahl von Komponenten unterstützt. Zudem wird der Anbieter unabhängiger von den Daten Dritter und kann für Produkte, aus einem bestehenden Produktkatalog die Lösung identifizieren, die die Anforderungen des Kunden erfüllen. Durch die Anwendung des Assistenzsystems ergeben sich unterschiedliche Alternativen für den Produktentwickler, die es notwendig machen, ein Entscheidungsmodell für die Unterstützung aufzustellen. Daher muss aufgrund der Zusammenarbeit von Anwendern aus unterschiedlichen Fachgebieten (Maschinenbau, Informatik, etc.), die oft räumlich getrennt arbeiten, die Möglichkeit zur Kollaboration innerhalb des Systems gegeben werden [Eh07].

Momentan befindet sich der Prototyp des Assistenzsystems in der Umsetzung und wird an ein PLM-System durch eine systemspezifische Schnittstelle gekoppelt. Zur Umsetzung des Prototyps wurde exemplarisch die Produktgruppe „Pumpen“ ausgewählt, da diese nicht nur die gestellten Anforderungen erfüllen, sondern darüber hinaus sowohl als „Produkt“ (Maschine), als auch als „Komponente“ (Bauteil einer Maschine) ausgewertet werden kann. Innerhalb des Projektes beschränkt sich die Umsetzung zurzeit auf die drei beschriebenen Use Cases, eine spätere Erweiterung ist aber möglich, wie der Anwendung des Systems bei Rückrufaktionen aus Sicherheitsgründen, zur Auswertung der Informationen aus den Vorgängerversionen der Maschine. Grundsätzlich ist die Umsetzung auch mit anderen Maschinen(-komponenten) (z.B. Fließbändern, Motoren) möglich, solange diese die Anforderungen wie hohe Stückzahl, kontinuierliche Verbesserung, Erfassung von objektiven Sensordaten erfüllen.

Das Problem der Datenbeschaffung wird in den noch folgenden Arbeitspaketen angegangen. Hierin werden die Use-Cases weiter detailliert und Dienstleistungen sowie Geschäftsmodelle erarbeitet, die es dem Anbieter erleichtern an PNI zu gelangen und die derzeit herrschenden Problematiken (z.B. Gewährleistungsverlust) zu lösen.

5 Danksagung

Die Arbeit wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes „Erweiterung der Produkt Lifecycle Managements durch wissenschaftliche Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung“ (WiRPro) unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [Ab08] Abramovici, M.; Fathi, M.; Holland, A.; Neubach, M.: Integration von Feedbackdaten aus der Produktnutzungsphase im Rahmen des PLM-Konzepts. In (MKWI 2008): Proceedings zur Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, München, 2008.
- [De03] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 31051 – Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [Di10] Dienst, S.; Ansari-Ch., F.; Holland, A.; Fathi, M.: Necessity of Using Dynamic Bayesian Networks for Feedback Analysis into Product Development. In (SMC 2010): IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Istanbul, 2010.
- [Eh07] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser Verlag, München Wien, 2007.
- [ES09] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [FH94] Fathi-Torbaghan, M.; Höffmann, A.: Fuzzy Logik und Blackboard-Modelle. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- [Ga09] Gabriel, R.; Gluchowski P.; Pastwa, A.: Data Warehouse & Data Mining. W3L-Verlag, Herdecke, Witten, 2009.
- [LF06] Lund, T.; Faulkner, E.; Robinson, M.: Condition Monitoring Using Bayesian Networks. In: Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) Annuals Meeting, Pittsburgh, 2006.

- [Pa07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [RN09] Russell, S. J.; Norvig P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, USA, 3rd edition, 2009.
- [Sc05] Scheer, A.-M., Boczanski, M., Muth, M., Schmitz, W.-G., Segelbacher, U.: Prozessorientiertes Product Lifecycle Management. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [Sc07] Schulte, S.: Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [Sc09] Schweiger, S.: Lebenszykluskosten optimieren. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [Ve93] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [Ve01] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2519 - Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [Ve04] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [WJ08] Wainwright, M. J.; Jordan, M.: Graphical Models, Exponential Families, and Variational Inference. Now Publishers, 2008.