

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Fakultät für Informatik

CSR-10-02

IT-Unterstützung zur energiesensitiven Produktentwicklung

Thomas Reichel · Gudula Rünger · Daniel Steger · Haibin Xu

Juli 2010

Chemnitzer Informatik-Berichte

Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik

Handlungsfeld

Virtuelle Produktentwicklung für energieeffiziente Produkte und Prozesse (PE)

IT-Unterstützung zur energiewirtschaftlichen Produktentwicklung*

Thomas Reichel

Gudula Rünger

Daniel Steger

Haibin Xu

7. Juli 2010

Kurzfassung

Die Entwicklung kostengünstiger, energiesparender und ressourcenschonender Produkte gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dabei bildet die Bewertung von Kosten und Energie über den gesamten Lebenszyklus des Produkts, von der Entwicklung und Fertigung über den Betrieb bis hin zum Recycling, auf Basis virtueller Prototypen eine wesentliche Grundlage. Da Entwurfsentscheidungen in frühen Phasen der Entwicklung, in denen noch kein realer Prototyp existiert, einen hohen Einfluss auf spätere Kosten haben können, besteht die Notwendigkeit empirische, entscheidungsrelevante Daten aus IT-Systemen der Produktentwicklung (z.B. Produktdatenmanagementsysteme) und des Betriebs (z.B. Enterprise-Resource-Planning-Systeme) zu extrahieren und dem Konstrukteur geeignete Methoden zur Aggregation der Daten bereitzustellen. Insbesondere bei der Optimierung hinsichtlich der Energieeffizienz von Produkten muss auf Daten des gesamten Lebenszyklus zurückgegriffen werden, um schon in der Entwicklungsphase Abschätzungen über den Energieverbrauch im Produktleben treffen zu können. Eine Optimierung der Energieeffizienz kann dabei sowohl durch die Steigerung der Produktivität bei gleichbleibendem Energieverbrauch als auch durch die Verringerung des Energieverbrauchs bei gleichbleibender Produktivität erfolgen.

In diesem Bericht soll der Produktentwicklungsprozess aus IT-Sicht betrachtet werden, indem zunächst aktuelle Methodiken der Produktentwicklung mit ihrer IT-Unterstützung und der beteiligten IT-Systeme untersucht werden. Es werden Anforderungen an ein IT-System formuliert, die Energieeffizienzbewertungen und -optimierungen in allen Phasen der Produktentwicklung unter Nutzung der beteiligten IT-Systeme ermöglichen. Ein solches IT-System zur energiesensitiven Produktentwicklung (energiesensitives Produktentwicklungssystem) soll den Konstrukteur bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte unterstützen. Dafür müssen die Funktionalitäten bestehender PDM-Systeme um Methoden zur Analyse, Synthese und Bewertung der Energieeffizienz des Produkts erweitert werden. Es wird abschließend vorgeschlagen, wie die Methoden zur Bewertung energierelevanter Daten durch Workflows umgesetzt werden können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Informationstechnologie in der Produktentwicklung	7
1.2	Energieeffizienz im Produktentwicklungsprozess (PEP)	8
2	Entwicklungsmethodiken	11
2.1	Methodik nach VDI 2221	12
2.2	Methodik nach VDI 2206	13
2.3	Property-Driven Design (PDD)	14
2.4	Property-Driven Design mit Berücksichtigung der Energieeffizienz .	16
3	Produktdatenmanagementsysteme (PDM-Systeme)	18
3.1	PDM-Systeme und CAD	18
3.2	Konfigurations- und Variantenmanagement	19
3.3	PDM-Systeme und Wissensmanagement	19
3.4	Bewertungskriterien eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems	20
3.5	Evaluierung von Produktdaten- (PDM) und Dokumentenmanagementsystemen (DMS)	22
3.6	Erweiterungsmöglichkeiten der untersuchten Systeme	24
3.7	Anforderungen an ein energiesensitives Datenmanagement	25
4	Abbildung von Produktentwicklungsprozessen durch Workflows	27
4.1	Gegenüberstellung von Geschäftsprozessen und Entwurfsprozessen .	27
4.2	Workflow-Management im Produktentwicklungsprozess	28
4.3	Anforderungen an ein Workflow-Managementsystem (WfMS)	30
5	Modellierung beispielhafter Prozesse der Produktentwicklung	31
5.1	Erstellung einer Anforderungsliste	31
5.2	Workflow einer Finite Elemente Simulation	33
5.3	Workflow eines energiesensitiven Produktentwicklungsprozesses . . .	34
6	Zusammenfassung	37
7	Literaturverzeichnis	39
A	Abkürzungsverzeichnis	41
B	Glossar virtuelle Produktentwicklung	43

1 Einführung

1.1 Informationstechnologie in der Produktentwicklung

Bei der Entwicklung neuer Produkte werden heute effiziente, schnelle und hoch-integrative Methoden benötigt. Dabei spielt der Rechnerinsatz während der gesamten Produktentwicklung eine wesentliche Rolle. Einerseits dient er dazu, parallel laufende, verteilte Entwicklungsanstrengungen zu koordinieren. Andererseits muss schon während der Produktentwicklung der gesamte Produktlebenszyklus in Betracht gezogen werden, um die Kosten für den späteren Betrieb bzw. das Recycling des Produkts zu optimieren. Aus IT-Sicht müssen dazu entscheidungsrelevante Daten der beteiligten IT-Systeme aus allen Lebenszyklusphasen bereit gestellt werden, d.h. die beteiligten IT-Systeme müssen in die Produktentwicklung integriert werden. Aktuell rücken zudem knapper werdende Ressourcen und der Energieverbrauch des Produkts in den Fokus. CAx-Werkzeuge tragen dieser Entwicklung Rechnung, indem sie Daten aus abgeschlossenen Entwicklungen für künftige Produkte in Form von virtuellen Prototypen zur Verfügung stellen. Virtuelle Prototypen werden dazu verwendet, Eigenschaften des physisch noch nicht vorhandenen Produkts abzuschätzen. Sie übernehmen immer mehr die Rolle von physischen Prototypen, so dass nicht nur schnellere Entwicklungszyklen ermöglicht werden, sondern auch Kosten, Energie und Material eingespart werden. Der Einsatz von virtuellen Prototypen wird durch den Begriff „Virtuelle Produktentwicklung“ charakterisiert.

Das Konzept der ganzheitlichen Betrachtung angewandt auf das herzustellende Produkt wird als „Product Lifecycle Management“ (PLM) bezeichnet. Es findet seinen Niederschlag darin, dass Aspekte und Einflüsse während des Produktlebens möglichst frühzeitig erkannt und berücksichtigt werden. Abbildung 1.1 illustriert, dass mit den Designentscheidungen aus den Phasen der Planung und Entwicklung der Ressourcen- und Energieverbrauch der späteren Phasen bestimmt werden. Vor allem für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen, z.B. Dreh- oder Fräsmaschinen, ist die Betrachtung des Betriebs wesentlich, da dort der ausschlaggebende Energieverbrauch des Produktlebenszyklus auftritt. Gleichzeitig fließen die Erfahrungen und Daten aus dem Betrieb des Produkts in zukünftige Entwicklungen ein, um dort genauere Prognosen für den Verbrauch neuer Produkte mit ähnlichen Eigenschaften zu ermöglichen.

Im Zentrum der Betrachtungen soll die IT-Unterstützung von Methoden für die Entwicklung ressourcenschonender und energiesparender Produkte (mit Schwerpunkt

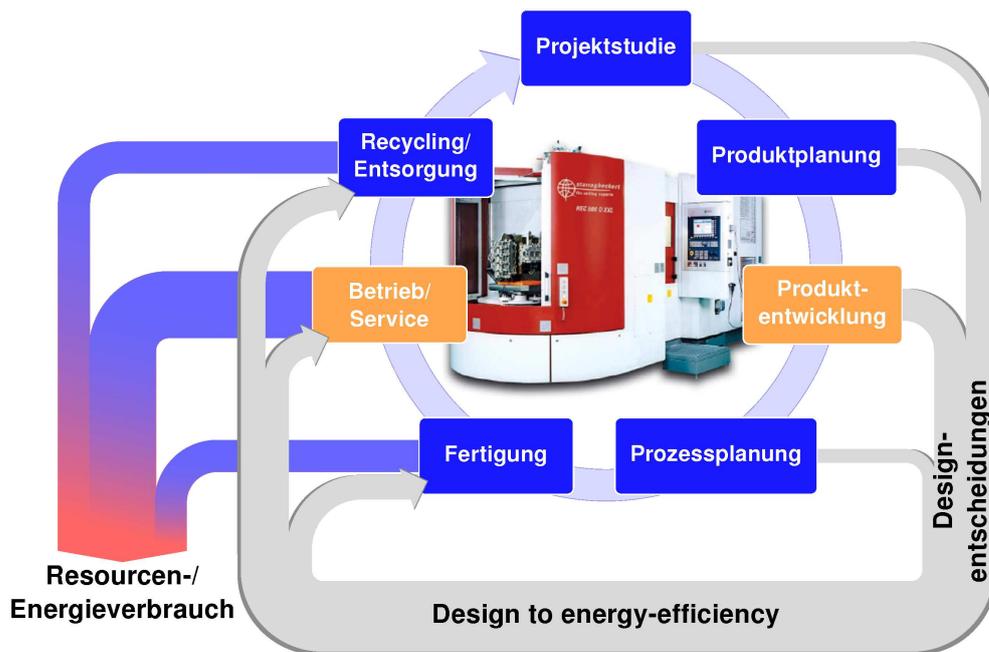


Abbildung 1.1: Auswirkungen von Entscheidungen der Produktentwicklung auf Energiekosten des Betriebs; Rückführung der Erfahrungen aus dem Betrieb in die Entwicklung. (Produktlebenszyklusphasen in Anlehnung an Vajna u. a. 2009).

Werkzeugmaschinen) stehen, die in einem energiesensitiven Produktentwicklungssystem realisiert werden. Dabei tritt die Berücksichtigung der Energieeffizienz, die für den Betrieb von Werkzeugmaschinen als Produktionsmenge pro Energieeinheit spezifiziert wird (Neugebauer u. a. 2009), in den Vordergrund (siehe auch Design to energy-efficiency, Glossar, Anhang B). Für die Berücksichtigung der Energieeffizienz im Produktentwicklungsprozess müssen Methoden und Vorgehensweisen einerseits und verwendete Produktdaten und -modelle andererseits untersucht und angepasst werden. Die beiden Ansatzpunkte sollen in den folgenden Kapiteln erörtert werden.

1.2 Energieeffizienz im Produktentwicklungsprozess (PEP)

Zur Entwicklung energieeffizienter Produkte kann eine Energiebilanzierung auf der Grundlage von Prozesswissen und der Energiekostenrechnung herangezogen werden. Für eine Bilanzierung werden Energieverbrauch bzw. Energiekosten während des Produktlebenszyklus für das zu entwickelnde Produkt abgeschätzt. Daher rückt vor allem die Betriebsphase in den Vordergrund. Für diese ist aktuell nur wenig über den Energieeinsatz bekannt, die Betriebskosten übersteigen aber bei langer Nutzungsdauer die Herstellungsaufwendungen bei weitem.

Zur Einbeziehung von Energieeffizienzbetrachtungen in den PEP stellt sich die Frage, wie durch ein bestimmtes Vorgehensmodell in der Entwicklung energieeffiziente Produkte geschaffen werden können. Eine Grundlage für ein Vorgehensmodell stellen bestehende Entwicklungsmethodiken dar, die durch Aspekte der Energieeffizienz erweitert werden müssen. Ein Softwaresystem zur Produktentwicklung kann für das Vorgehensmodell die informationstechnischen Grundlagen liefern, indem es Methoden und Herangehensweisen als Softwarebausteine bereitstellt und mit Berechnungen hinterlegt. Der Entwicklungsprozess selbst stellt bereits eine große Herausforderung dar, da er durch Dynamik, Vielfältigkeit und Komplexität der Abläufe geprägt ist. Vor allem der „Design to energie-efficiency“-Gedanke (d.h. das kontinuierliche Planen/Entwickeln mit Hinblick Energieeffizienz) kann als ziel führend betrachtet werden, da damit Gestaltungsrichtlinien für die Entwicklung energieeffizienter Produkte eingeführt werden können. Die IT-technische Unterstützung für das kontinuierliche Planen und Entwickeln in Hinblick auf Energieeffizienz leistet z.T. die Automatisierung bestimmter Arbeitsprozesse, aber vor allem die konsequente Einbindung der Energieeffizienz in virtuelle Prototypen und deren Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung, etwa durch Einbindung der Finiten Elemente Methode oder anderer Simulations- und Optimierungswerkzeuge.

Bei der Modellierung von Eigenschaften eines Produkts hinsichtlich der Energie können auf Grund der Komplexität nicht alle Energieflüsse des Produkts im Produktmodell (d.h. die Gesamtheit aller digitaler Abbildungen der Produktmerkmale und -eigenschaften) erfasst werden. Zur Steuerung des PEP mit dem Ziel Energieeffizienz scheinen daher Indikatoren oder Kennzahlen geeignet, die als Bewertungskriterien herangezogen werden können. Eine Software kann die Indikatoren und Kennzahlen nach einer gegebenen Vorschrift errechnen und stellt sie dem Ingenieur zur Verfügung. Für das Gebiet des Lifecycle Assessment (vgl. Glossar, Anhang B) existieren solche Indikatoren bereits, z.B. Cumulated Energy Demand (CED) oder Material input per service unit (MIPS). Beispielhaft sei auf die Arbeit von Abele, Anderl und Birkhofer 2005 verwiesen, in der u. a. ein Ökoindex eingeführt wird, mit dem ökologische Auswirkungen im Produktlebenszyklus schon während der Produktentwicklung bewertet werden können.

Durch die Betrachtung der Energieeffizienz ist ein Mehraufwand in der Produktentwicklung nicht zu vermeiden. Einerseits müssen zusätzliche Schritte zur Bewertung der Energieeffizienz durchgeführt werden. Andererseits ist auch die Suche, Analyse und Dokumentation von Alternativlösungen notwendig, um optimale Energieeinsparungen zu erreichen. Rechnerunterstützung kann hier eine gezielte Hilfestellung geben, indem in gleicher Zeit mehrere Lösungsalternativen betrachtet werden und eine günstige Lösung ausgewählt werden kann. Insbesondere die Fragestellung, wie sich die Energieeffizienz für das Produkt ändert, wenn Bauteil A durch ein alternatives Bauteil B ausgetauscht wurde bzw. welches andere Bauteil eingesetzt werden sollte, steht dabei im Mittelpunkt.

Insgesamt sollen folgende Aspekte für den Entwurf und die Realisierung eines IT-Systems zur energiesensitiven Produktentwicklung betrachtet werden:

- Wie kann ein Konzept für die IT-Unterstützung des „Design to energy-efficiency“-Gedanken im Unternehmen aussehen?
- Wie können bestehende Softwarekomponenten, wie z.B. CAD-Programm und Produktdatenmanagement (Product Data Management) (PDM), in ein solches Konzept eingebunden werden?
- Wie kann der Prototyp für ein Softwaresystem zur energiesensitiven Produktentwicklung aussehen, wobei dieses basierend auf einer modernen Workflow-Architektur implementiert werden soll?

Der vorliegende Beitrag geht in Kapitel 2 auf Methodiken der Produktentwicklung ein und untersucht bestehende Produktdatenmanagementsysteme zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen in Kapitel 3. Aus dieser Betrachtung heraus werden in Kapitel 4 Herangehensweisen und Anforderungen zur Umsetzung energiesensitiver PEPs mit Hilfe von Workflows abgeleitet und ihre Umsetzung in einer Softwarearchitektur diskutiert.

2 Entwicklungsmethodiken

Bei der Betrachtung von Produktentwicklungsprozessen (PEP) werden zwei unterschiedliche Herangehensweisen deutlich. Einerseits existieren Methodiken, wie die Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure VDI 2221 und VDI 2206, die konkrete Vorgehensweisen für Planung, Entwurf und Entwicklung festlegen. Damit verbunden ist ein strenges Dokumentationsreglement, das die Ergebnisdokumente jedes Prozessschritts festlegt. Das Management von neuen oder geänderten Anforderungen in einem beliebigen Prozessschritt ist jedoch nicht durch diese Methodiken abgedeckt und muss somit separat gesteuert werden. Ein praktisches Problem stellt auch die umfangreiche Dokumentenerstellung in jedem Prozessschritt dar.

Andererseits werden Methodiken vorgeschlagen, die keinen konkreten Ablauf der Prozessschritte der Produktentwicklung festlegen, sondern nur abstrakte Handlungsanweisungen in kurzen Iterationszyklen beschreiben, ohne konkrete Ergebnisdokumente zu benennen oder bestimmte Vorgehensweisen für Planung, Entwurf und Entwicklung vorzugeben (z.B. das Property-Driven Design (PDD)). Diese Methodiken finden vor allem dann Anwendung, wenn ein neues Produkt maßgeblich auf Erfahrungen aus bereits entwickelten Produkten aufbaut. Durch die Flexibilität der Methodiken können Änderungen und Anpassungen der Anforderungen einfach in den Entwicklungsprozess integriert werden, wobei das Änderungsmanagement auch hier separat von der Methodik gesteuert werden muss.

Die beschriebenen Formen der Produktentwicklung werden ausführlich von Ehrlenspiel 2009 beschrieben, wobei er gleichzeitig die Grundlage für eine praxisorientierte Methodik legt, die eine Konstruktion nach bestehender Erfahrung ohne konkrete Methodik für eher „normale“ Aufgaben und den Wechsel in eine systematische Methodik (z.B. eine VDI-Richtlinie) für komplexe oder möglichst optimale (Teil-)Lösungen vorschlägt. Andere Konstruktionsmethodiker, wie Vajna 2007 und Weber und Deubel 2003 beschreiben die Methodik des PDD, bei dem kurze Entwicklungszyklen aus Problemanalyse, Anpassung der bestehenden Lösung und Verifikation des Ergebnisses betont werden, ohne dass konkrete Entwicklungsphasen benannt werden. PDD lässt dem Produktentwickler damit die gewünschte Freiheit und zeichnet sich durch ein einfaches Schema aus.

Für eine Unterstützung eines energiesensitiven PEP durch ein IT-System ergeben sich die folgenden Problemstellungen:

1. Wie lässt sich der dynamische, zyklische und teilweise nicht vorhersehbare PEP in einen im Rechner darstellbaren Prozess überführen?

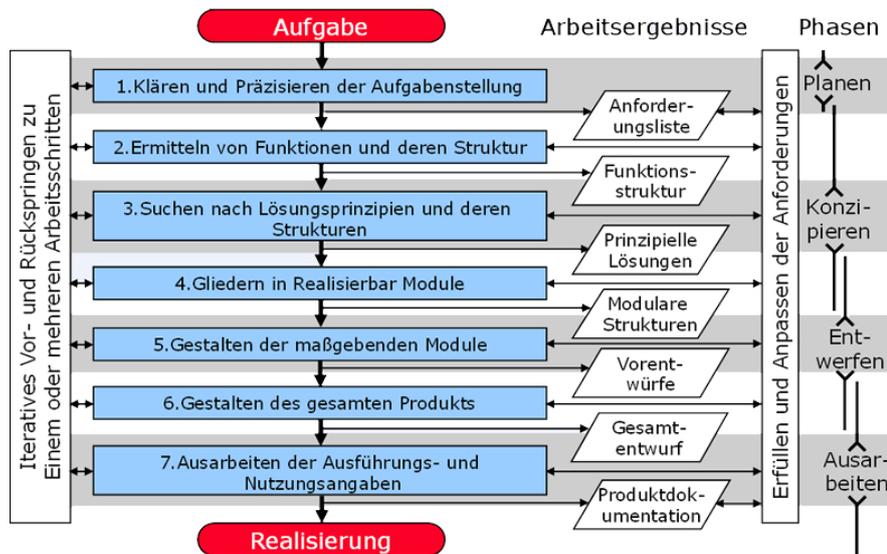


Abbildung 2.1: Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 (Quelle: <http://wiki.ipe-md.de>, Stand Oktober 2009).

2. Wo finden sich Ansatzpunkte im PEP, um Energieeffizienzbetrachtungen zu integrieren?
3. Wie kann das Produktentwicklungssystem so gestaltet werden, dass es den Konstrukteuren die notwendige Flexibilität bietet?

Insbesondere die IT-Unterstützung für Problemstellung 1 bedingt eine Umsetzung in eine formale Prozessbeschreibung (Workflows), die mit Hilfe von Workflow-Managementsystemen (WfMS) rechnergestützt ausgeführt werden können.

In den folgenden Abschnitten sollen drei Methodiken zur Produktentwicklung eingehender betrachtet und Ansätze zur Umsetzung für ein integriertes IT-System aufgezeigt werden.

2.1 Methodik nach VDI 2221

Die VDI 2221 beschreibt eine klassische Entwicklungsmethodik, die im deutschsprachigen Raum verbreitet ist. Sie gliedert sich in sieben Einzelschritte, die im Idealfall sukzessiv abgearbeitet werden. Zusätzlich werden Abweichungen vom Idealfall über das *Iterative Vor- und Rückspringen*, z.B. bei Änderungen von Anforderungen, angedeutet. Die jeweils geforderten Ergebnisdokumente sind neben der Beschreibung der Phase angeordnet. Abbildung 2.1 verdeutlicht den Ablauf einer Konstruktion nach VDI 2221.

Die VDI 2221 unterscheidet die folgenden Entwicklungsvarianten, in denen bestimmte Prozessschritte übersprungen werden können:

Neukonstruktion Kompletter Prozess muss durchlaufen werden.

Der Anteil der Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten ist sehr hoch. Die Schritte 1 bis 4 müssen detailliert durchlaufen werden.

Anpassungskonstruktion Konzept und genereller Entwurf liegen vor.

Es werden zusätzliche bzw. angepasste Anforderungen spezifiziert, für die auch die Schritte 1 bis 4 durchlaufen werden müssen. Unveränderte Anforderungen mit ihren Ergebnisdokumenten können häufig übernommen werden. Dabei steht die Frage nach den Auswirkungen der Änderungen auf die bisherige Konstruktion im Mittelpunkt.

Variantenkonstruktion Alle Teile des Produkts, Größenbereiche und Kombinationen sind bekannt.

Häufig wird eine konkrete Baugruppe ausgetauscht, so dass nur eine begrenzte Auswirkung auf das gesamte Produkt besteht. Zur Berechnung von Änderungen können häufig Kennzahlen oder feste Algorithmen verwendet werden (z.B. ein leistungsstärkerer Motor benötigt eine um einen bestimmten Faktor festere Nockenwelle).

Die klassische Methodik nach VDI 2221 zur Beschreibung des Entwicklungsprozesses (Roth 2000; Pahl u. a. 2006) bietet sich auf Grund der festgelegten Prozessschritte zur Integration in ein IT-System an. Allerdings ist die Dynamik durch den spontanen Wechsel der Prozessschritte (Iteratives Vor- und Zurückspringen) bei Ausführung des Prozesses eher schwierig zu beherrschen.

2.2 Methodik nach VDI 2206

Mit der VDI 2206 wurde eine Erweiterung des Entwicklungsprozesses nach VDI 2221 geschaffen, die den mechatronischen Entwurf berücksichtigt und die Dynamik des Prozesses unterstreicht. In dem als V dargestellten Modell (Abbildung 2.2) findet sich der *domänenspezifische Entwurf* wieder, mit dem Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik verbunden werden. Eine übergeordnete Systemschicht definiert die Architektur und legt die Anforderungen für die domänenspezifischen Entwicklungstätigkeiten im *Systementwurf* fest. Im Umkehrschluss werden die Ergebnisse in der *Systemintegration* wieder zum Gesamtsystem zurückgeführt. Durch *Eigenschaftsabsicherung* kann überprüft werden, ob das entwickelte Produkt den Anforderungen entspricht.

Dieses Vorgehen wird häufig in der Praxis von erfahrenen Konstrukteuren bspw. zur Entwicklung von Werkzeugmaschinen eingesetzt, wobei auf bestehendes Wissen bereits existierender Maschinen zurück gegriffen wird. Die Methodik bleibt bei der Konkretisierung von Einzelprozessen (z.B. für Maschinenbau, Elektrotechnik und

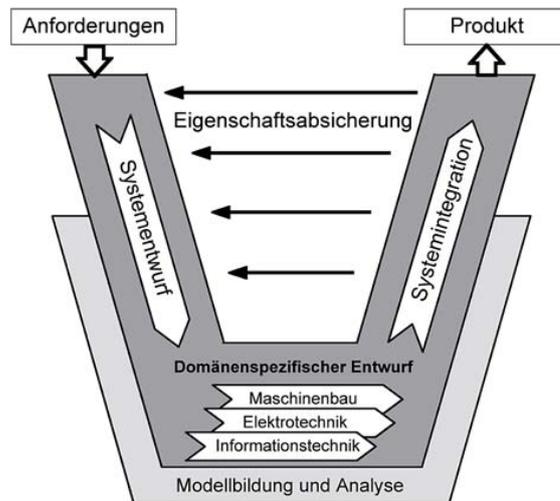


Abbildung 2.2: Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 (Quelle: Vajna u. a. 2009).

Informationstechnik) sehr vage, hebt aber die Dynamik innerhalb der Produktentwicklung hervor. Die Richtlinie VDI 2206 stellt damit erhöhte Anforderungen an ein Workflow Management System (WfMS). Statt einer vordefinierten Abarbeitungsreihenfolge, die im Workflow eingesetzt wird, müssen ständig ändernde Prozesse berücksichtigt werden. Das WfMS muss somit während der Ausführung eine flexible Anpassung der Workflows an die tatsächlichen Abläufe ermöglichen.

2.3 Property-Driven Design (PDD)

Die bisher vorgestellten Methodiken VDI 2221 und VDI 2206 erfordern erst bei der Konstruktion konkreterer CAD-Modelle Rechnerunterstützung. Wie eingangs beschrieben, werden die richtungsweisenden Entscheidungen in Bezug auf Energie und Kosten im Lebenszyklus des Produkts bereits vor dem Entwurf konkreter CAD-Modelle getroffen. Eine Rechnerunterstützung in den frühen Phasen ist in den Methodiken nicht vorgesehen.

Der Property-Driven Design-Ansatz (PDD) ersetzt die feststehenden Entwicklungsphasen durch einen kurzen Regelkreislauf aus Analyse, Synthese und Verifikation, der im gesamten Entwicklungsprozess für einzelne Baugruppen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad (z.B. in Planung, Entwicklung oder (Detail-)Konstruktion der Baugruppe) wiederholt wird. Nach Weber, Werner und Deubel 2002 werden Produkte durch Merkmale und Eigenschaften beschrieben. Merkmale (*characteristics*) beschreiben dabei die physikalischen Parameter des Produkts, wie seine Struktur, Form und Materialbeschaffenheit. Eigenschaften (*properties*) definieren hingegen das Verhalten des Produkts, das durch eine geeignete Wahl der Merkmale entsprechend den Anforderungen erzeugt wird. Der Konstrukteur kann dabei nur direkten Einfluss auf die Merkmale des Produkts nehmen, nicht jedoch auf seine Eigenschaften, die indirekt durch die Merkmale entstehen.

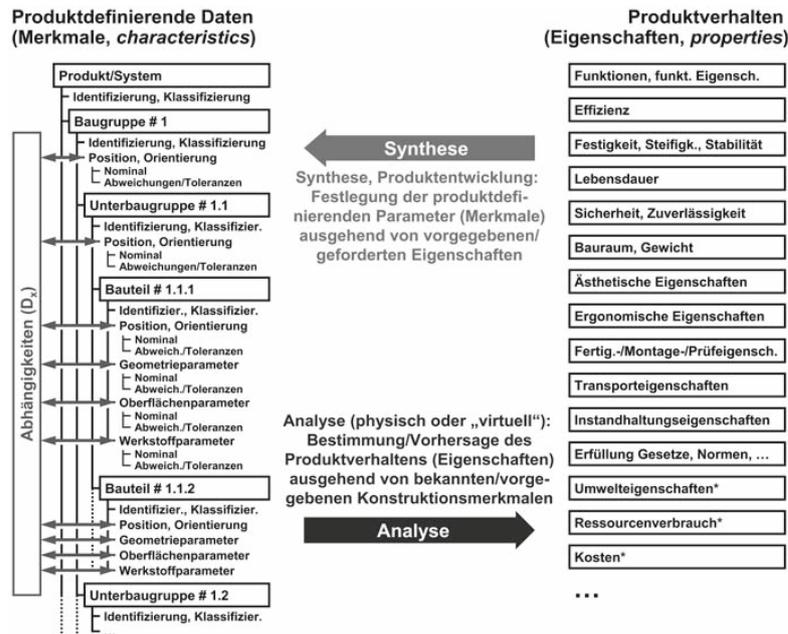


Abbildung 2.3: Anwendung von Analyse- und Syntheseschritten des Property-Driven Design-Ansatzes auf die Produktstruktur (Quelle: Vajna u. a. 2009).

Die folgenden Formeln beschreiben die Beziehung zwischen Merkmalen und Eigenschaften im Analyse- und Syntheseschritt.

Analyse:

$$\bigcup_{C_i \in C} C_i \xrightarrow{R_k} P_j^*$$

Synthese:

$$P_j \xrightarrow{R_k^{-1}} \bigcup_{C_i \in C} C_i$$

mit

- C Menge der Merkmale
- P_j^* vorhergesagte Eigenschaft (Ist-Zustand)
- P_j geforderte Eigenschaft (Soll-Zustand)
- R_k Analysebeziehung
- R_k^{-1} Synthesebeziehung

In der Analysephase untersucht der Konstrukteur die Eigenschaften des Produkts basierend auf den vorliegenden Merkmalen (Ist-Zustand). Dabei kommen Experimente mit virtuellen oder physischen Prototypen zum Einsatz. In der darauf folgenden Synthese werden ausgehend von den geforderten Produkteigenschaften (Soll-Zustand) beteiligte Merkmale identifiziert und quantifiziert. Ein abschließender Verifikationsschritt gleicht Ist- und Soll-Zustand ab und beendet den Zyklus. Eine Neukonstruktion nach Weber, Werner und Deubel 2002 beginnt mit einem Syntheseschritt, der die initialen Merkmale des Produkts festlegt. Neugebauer u. a. 2009 argumentieren, dass auch bei einer Neukonstruktion Erfahrungen über ähnliche Produkte bestehen. Eine Analyse bestehender Produkte wird dabei als Ausgangspunkt einer Neukonstruktion gewählt.

Abbildung 2.3 konkretisiert die Analyse- und Syntheseschritte des PDD anhand einer Produktstruktur. Hier werden Analyse-Synthese-Zyklen auch auf Bauteile bzw. Unterbaugruppen angewendet. Dabei müssen in den Syntheseschritten (R_k^{-1}) auch

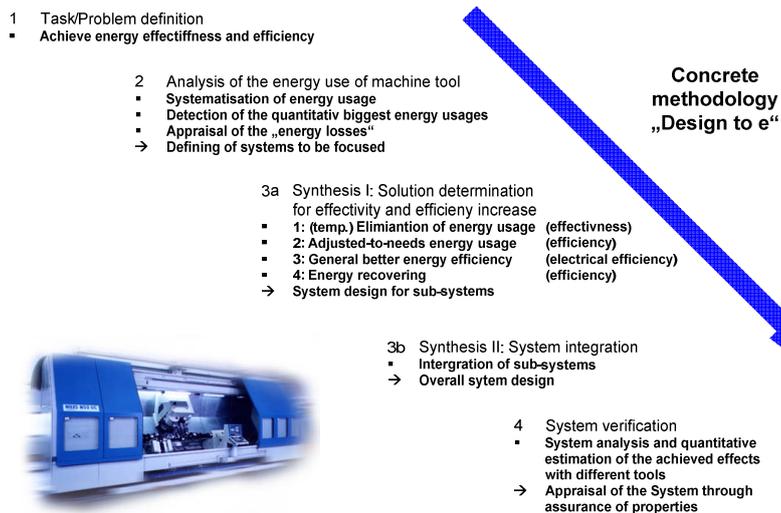


Abbildung 2.4: Konkrete Handlungsanweisungen für ein *Design to energy-efficiency* (Quelle: Neugebauer u. a. 2009).

Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen (D_x , Abbildung 2.3 links) beachtet werden, da Anpassungen von Merkmalen für eine Eigenschaft andere Eigenschaften beeinflussen können. Zur Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten wird in der nachfolgend vorgestellten Konkretisierung des PDD-Ansatzes hinsichtlich Energieeffizienz von Neugebauer u. a. 2009 die Synthese zunächst auf Bauteil/Unterbaugruppenebene und danach für die gesamte Produktstruktur durchgeführt.

2.4 Property-Driven Design mit Berücksichtigung der Energieeffizienz

Neugebauer u. a. 2009 greift den im vorigen Abschnitt beschriebenen PDD-Ansatz auf und erweitert ihn um Methoden für den Entwurf energieeffizienter Werkzeugmaschinen. Dabei werden für jede Phase konkrete Handlungsanweisungen gegeben, um effiziente und leistungsfähige Produkte zu entwickeln (*Design to energy-efficiency*) und Ansätze zur Berechnung von Energieeffizienz (Menge produzierter Produkte pro eingesetzte Energieeinheit) und -effektivität („Wirkungsgrad“ eingesetzter Energie) gegeben.

Mit der Erweiterung der PDD-Methodik durch den zusätzlichen Syntheseschritt (*Synthesis II*) und den vorgeschlagenen Handlungsanweisungen zur Entwicklung energieeffizienter Produkte ist dieser Ansatz sehr gut geeignet, um in ein IT-System überführt zu werden. Dazu müssen die Handlungsweisen in den PDD-Phasen in Einzelprozesse ausgelagert werden, die von einem übergeordneten PEP in der entsprechenden Phase angestoßen werden können. Eine Quantifizierung der Produkteigenschaften kann in der Verifikationsphase zusätzlich durch hinterlegte Berechnungsvorschriften unterstützt werden.

Eine Überführung der PDD-Methodik von Neugebauer u. a. 2009 in einen hierarchischen Workflow zur Ausführung in einem Workflow-Managementsystem und die Einbettung des Workflows in ein IT-System wird in Kapitel 4 vorgestellt. Um Anforderungen an das IT-System zu untersuchen, werden zunächst bestehende IT-Systeme zur Verwaltung von Produktdaten (Produktdatenmanagement- und Enterprise-Dokumentenmanagementsysteme) evaluiert, die eine wesentliche Komponente eines IT-Systems zur Produktentwicklung bilden.

3 Produktdatenmanagementsysteme (PDM-Systeme)

Produktdatenmanagement (PDM) und das darauf aufbauende Produktlebenszyklusmanagement (PLM) gelten heute als zentrale IT-Lösungen für die Datenhaltung im Produktentwicklungsprozess (PEP) mit enger Verknüpfung zu Konstruktionswerkzeugen (Eigner und Stelzer 2009). Workflow-Management stellt ein wesentliches Aufgabengebiet dieser Systeme bspw. für Änderungs- oder Freigabe-Workflows dar. Zur Ausführung der Workflows werden Workflow-Managementsysteme (WfMS) in die PLM- bzw. PDM-Systeme integriert. Neben Systemen, die sich hauptsächlich der Produktentwicklung widmen, werden auch Enterprise-Dokumentenmanagementsysteme (DMS) eingesetzt, die eine allgemeine Dokumenten- und Datenverwaltung für Unternehmen, also ohne spezielle Unterstützung für Daten der Produktentwicklung, zur Verfügung stellen.

Eine Unterstützung für Energieeffizienzbetrachtungen ist in aktuellen Systemen nur im Sinne des Verwaltens entsprechender Dokumente vorhanden, da sowohl notwendige Daten aus der Produktentwicklung (Energiedaten für die Fertigung des Produkts) als auch Energiedaten für den Betrieb des Produkts kaum erhoben und zusammengeführt werden. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass es eine solche Verknüpfung erfordern würde, Betriebsdaten des Kunden (z.B. aus einem ERP-System) dem Hersteller der Maschine zur Verfügung zu stellen.

Im Folgenden sollen die Beziehungen zwischen PDM-Systemen und verwandten Systemen wie CAD- und Wissensmanagementsystemen unter dem Aspekt der Entwicklung energieeffizienter Produkte diskutiert werden. Anschließend sollen bestehende PDM-Systeme evaluiert und ihr Potential für eine energiesensitive Produktentwicklung erörtert werden.

3.1 PDM-Systeme und CAD

Der Einsatz von PDM-Systemen ist notwendig, um eine kollaborative Entwicklung zu ermöglichen, in der Konstrukteure an möglicherweise unterschiedlichen Unternehmensstandorten zusammenarbeiten können. CAD-Systeme an sich ermöglichen dies nur bedingt, da ein Austausch der Daten zwischen Konstrukteuren genauso wenig unterstützt wird, wie Vereinheitlichungen in der Konstruktion, etwa bzgl. der Benennung von Bauteilen.

Es ist deshalb nahe liegend, Energiebetrachtungen auf das CAD-Modell auszuweiten. Ein erster Ansatz kann hier das Feature-based Modelling bieten. Unter einem „Feature“ versteht man einen Teilbereich eines Produkts, der unter einem bestimmten informationstechnischen Gesichtspunkt zusammengefasst wird, also eine bestimmte Semantik besitzt. Ein Feature spiegelt somit eine bestimmte Eigenschaften des Produkts wider (siehe Vajna u. a. 2009). Bei aktuellen CAD-Programmen beschränkt sich der Begriff „Feature“ meist nur auf geometrische Objekte und den damit verbundenen Eigenschaften. Eine Untersuchung von Features in ihrer verallgemeinerten Form kann Auskunft darüber geben, wie ihnen relevante Energiegrößen modelliert werden können, ähnlich wie es von Lasi 2007 für Kundenanforderungen vorgeschlagen wurde.

3.2 Konfigurations- und Variantenmanagement

Die Aufgabe des Konfigurationsmanagements besteht darin, aus einer generischen Produktstruktur nach bestimmten vorgegebenen Regeln ein konkretes Produkt abzuleiten. Generische Komponenten können sich dabei z.B. in der Leistung unterscheiden, aber in ihrer sonstigen Beschaffenheit identisch sein. Es ergeben sich somit eine Reihe von Fertigungsvarianten. Für die Fertigung des Produkts wird eine konkrete Ausprägung einer generischen Komponente gewählt. Auf diese Weise wird einer Firma ermöglicht, einheitliche Produktfamilien nach einem kostensparenden Baukastenprinzip zu erstellen.

Eine Erweiterung des Variantenmanagement um eine energiebezogene Sichtweise scheint nahe liegend. Denkbar ist, Abwandlungen des Produkts aufgrund von energetischen Aspekten zu betrachten. Bisherige Ansätze, wie beispielsweise von Prof. H. Meerkamm 2008, versuchen mittels Ähnlichkeitssuche geometrisch oder topologisch ähnliche Bauteile zu finden. Eine Energiebetrachtung damit zu verbinden, kann heißen, eine Entscheidungshilfe zur Auswahl von energiekostengünstigsten Bauteilen zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise könnte aus vorgeschlagenen Bauteilen ein Produkt erzeugt werden, wobei die Auswahl aufgrund einer gespeicherten Energiekostenanalyse unter Einbeziehung von Lebenszyklusdaten erfolgt. Möglich wäre auch die Einbeziehung der Ergebnisse früherer Auswahlvorgänge unter ähnlichen Bedingungen.

3.3 PDM-Systeme und Wissensmanagement

An dieser Stelle schließt sich ein weiterer Punkt an, der die Beziehung zwischen PDM-Systemen und Wissensmanagement (Product Knowledge Management (PKM)) und deren Abgrenzung zueinander betrifft. Oberflächlich betrachtet, könnte man meinen, beide Systeme würden gleiche Funktionen zur Bereitstellung von Daten nur auf unterschiedliche Weise erfüllen. Tatsächlich sollte aber eine klare Trennung der

Zuständigkeiten zwischen beiden System herausgearbeitet werden. PKM-Systeme stellen Produktwissen (z.B. Beziehungen zwischen Bauteilen) und Prozesswissen z.B. mit Hilfe von Ontologien bereit, wohingegen PDM-Systeme digitale Produktmodelle und mit dem PEP verbundene Dokumente und Workflows zur Bearbeitung der Dokumente verwalten.

Zum jetzigen Zeitpunkt scheint es zwar denkbar, dass Teile des Produktmodells auch ihren Niederschlag im PKM finden, jedoch wird zu keiner Zeit ein (semantisch) vollständiges Produktmodell vorliegen, das alle Aspekte des Produkts integriert, wie es für die Abbildung des PEP notwendig ist. Die folgende Übersicht soll anhand von Fragestellungen, die vom jeweiligen System zu beantworten sind, die Unterschiede zwischen PDM und PKM-Systemen herausstellen.

<i>PDM / Dokumente</i>	<i>PKM / Wissen</i>
Liste Berechnungs- bzw. Kostenmethoden auf und führe sie auf Anforderung aus.	Welche Berechnungs- bzw. Kostenmethode ist aktuell am besten geeignet?
Stelle Produktdaten und verbundene Dokumente zur Verfügung.	Wie viel Informationen zum PEP gibt es?
Stelle Energieeffizienz-Parameter des Produkts dar.	Welche Bauteile sind energetisch am günstigsten?
Dokumentiere Entscheidungen.	Warum wurde eine Entscheidung getroffen?

Das Zusammenwirken bzw. die Integration von PDM und PKM-Systemen findet in der Praxis im Moment noch wenig Beachtung, da zum einen das Eigenverständnis und die Abgrenzung zu anderen Systemen bisher noch ungenügend erfasst ist. Zum Anderen ist die Verknüpfung von Produktdatenmanagement und Wissensmanagement momentan noch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, wobei die Ablage und Abfrage von Wissen wesentlicher Bestandteil von Energieeffizienzbetrachtungen ist.

3.4 Bewertungskriterien eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems

Für den Einsatz eines PDM-Systems sind die folgenden Kriterien von besonderer Bedeutung (siehe auch Goltz, Müller und Müller 2003, Scheer u. a. 2006 und Vajna u. a. 2009) und müssen daher auch in einem energiesensitiven Produktentwicklungssystem berücksichtigt werden:

Produktstruktur-/Konfigurationsmanagement

- Darstellung des Produkts als Hierarchie aus Komponenten (Einzelteile, Baugruppen, Materialien, usw.);

- Ablage der Information über die Komponenten in Teilstammsätzen bzw. Stücklisten;
- Versionierung der Komponenten;
- Produktvarianten und Konfigurationen können verwaltet werden.

Daten- und Dokumentenmanagement

- Verwaltung aller Dokumente und Daten, die nicht Teil der Produktstruktur sind, z.B. Stücklisten, CAD-Daten, FEM, Workflows, Projekte, Personen, Textdokumente;
- Unterstützung von Versionierung, Ein-/Auschecken (Sperrung) der Dokumente;
- Methoden zur Archivierung der Dokumente.

Prozess-/Workflow-Management

- Verwaltung von Nutzern, Rollen und Zugriffsrechten im Zusammenhang mit der Projektverwaltung;
- Freigabe- und Änderungsabläufe, die kollaboratives Arbeiten ermöglichen.

Projektmanagement

- Verwaltung von Terminen, Personen, Projekten;
- Aufgabenplanung, -steuerung, -überwachung.

Klassifikation/Teilfamilienmanagement

- Festlegung zusätzlicher Attribute zum Auffinden von Dokumenten;
- Sachmerkmalslisten.

Aus dieser Aufzählung wird deutlich, dass die hauptsächlichen Aufgaben von PDM-Systemen mit der Produktstruktur und den damit verbundenen Dokumenten zusammenhängen. Wesentlich ist nicht nur die Abspeicherung von Entwicklungsständen als Versionen der einzelnen Komponenten, sondern auch eine einheitliche Benennung und das gemeinschaftliche Arbeiten über Versionsverwaltungsmechanismen hinaus. Das PDM sorgt dafür, dass beschlossene organisatorische Vorgehensweisen und Richtlinien des Unternehmens auch im täglichen Entwicklungsbetrieb umgesetzt werden. Zugleich bietet es die Schnittstelle zu anderen Bereichen des Unternehmens oder zu anderen Unternehmen. So hat bspw. die Fertigung Zugriff auf Produktdaten in Form von Stücklisten, die zur Herstellung des Produkts genutzt werden können. Da diese Daten in versionierter Form vorliegen, können sie auch für komplexe Produktionsszenarien mit einer Vielzahl an Produktvarianten genutzt werden und ermöglichen im Falle einer Reparatur genaue Aussagen, über die verbauten Komponenten, selbst wenn diese Produktvariante aktuell nicht mehr hergestellt wird.

Die Integration spezieller Methoden zur Unterstützung der Konstruktion (z.B. bei der Suche geeigneter Baugruppen) spielt für aktuelle PDM-Systeme eher eine untergeordnete Rolle. Vor allem die Rückführung von Daten aus Fertigung und Betrieb des Produkts in die Entwicklung stellt gegenwärtig eine große Herausforderung dar.

Die Erweiterung um diese Methoden auf Basis von Workflows ist daher wesentliches Ziel des energiesensitiven Produktentwicklungssystems.

3.5 Evaluierung von Produktdaten- (PDM) und Dokumentenmanagementsystemen (DMS)

Ziel der nachfolgenden Betrachtung bestehender DMS und PDM-Systeme ist es festzulegen, welchen Anforderungen ein energiesensitives Produktentwicklungssystem genügen muss und in welcher Weise die evaluierten Systeme erweitert werden können, um das interne digitale Produktmodell um Energiedaten zu ergänzen und Methoden zur Abschätzung von Energiekenngrößen (z.B. Energieverbrauch) zu realisieren. Da der PEP als hierarchischer Workflow abgebildet werden soll, muss darüber hinaus untersucht werden, inwieweit die in DMS bzw. PDM-Systemen integrierten Workflow-Managementsysteme geeignete Anpassungsmöglichkeiten bieten.

Zu der Evaluierung wurden die folgenden Systeme gegenübergestellt:

- aras INNOVATOR® (PDM)
- PROCAD PRO.FILE (PDM)
- Autodesk Inventor® mit Autodesk Data Management Server (ADMS) (PDM)
- PTC Windchill® (PDM)
- Alfresco™ (DMS)
- Nuxeo EP™ (DMS)

Dabei wurde für die Systeme eine Liste mit 50 Merkmalen untersucht, die zusätzlich nach ihrer Relevanz für das energiesensitive Produktentwicklungssystem bewertet wurde. Die vollständige Liste der Merkmale ist in Anhang C dargestellt. Im Folgenden werden nur die wesentlichen Details der Evaluation der Systeme vorgestellt.

aras INNOVATOR® Der aras INNOVATOR® unterstützt vor allem Funktionen rund um das Projektmanagement (darunter auch Risk- und Qualitätsmanagement). Eine Integration von CAX-Werkzeugen ist nicht ohne weiteres möglich. Es stehen (bis auf CATIA V5) nur kommerzielle Lösungen zur Integration von CAD-Daten zur Verfügung. Die Strukturen der Daten, Server- und Clientskripte sowie selbst definierte Formulare ermöglichen individuelle Anpassungen für ein rudimentäres DMS. Als Plattform ist MS Windows, MS Server und MS Visual Studio .NET notwendig. Der Programmcode der Kernkomponente, sowie Dokumentation für das Produkt und Erweiterungen sind teilweise frei verfügbar.

PROCAD PRO.FILE PROCAD PRO.FILE ist ein komplett kommerzielles Produkt, das laut Dokumentation alle o.g. Bestandteile eines PDM mitbringt

(inkl. CAD-Integration von Pro/ENGINEER, Inventor und SolidWorks). Erweiterungen oder Anbindungsmöglichkeiten für das System sind nicht frei verfügbar.

Autodesk Inventor® mit Autodesk Data Management Server (ADMS) Autodesk Inventor® mit Autodesk Data Management Server (ADMS) ist in die Autodesk Produktpalette integriert. Die Integration von CAD-Daten anderer Anbieter ist nur über zusätzliche Komponenten möglich. Im ADMS sind keine Funktionalitäten zum Projektmanagement vorgesehen (ProductStream Professional notwendig). Die Erweiterungsmöglichkeiten dagegen sind gut, da Softwareentwicklungsbibliotheken sowohl für Inventor als auch für den ADMS selbst vorliegen. Ein vollständiges PDM mit erweiterter Funktionalität liefert das kommerzielle Autodesk Produkt ProductStream. ADMS liefert jedoch die Grundlage für eine mögliche CAD-Integration (nur Inventor) in ein DMS.

PTC Windchill® Im Zusammenspiel mit dem CAD-Werkzeug Pro/ENGINEER bietet PTC Windchill® den größten Funktionsumfang aller untersuchten Systeme. Die Produktsuite von Windchill ist in diverse Module aufgefächert, die eine fast unerschöpfliche Vielfalt an Funktionen zur Verfügung stellen. Die Integration von weiteren CAD-Produkten ist per Zusatzmodul möglich. Erweiterungen oder eine Anbindung an eigene Systeme sind vorgesehen, erfordern aber meist das Wissen einer darauf spezialisierten Firma.

Alfresco™ und Nuxeo EP™ Die Open-Source DMS Alfresco™ und Nuxeo EP™ bieten ein Web-basiertes Dokumentenmanagement auf Basis der JBoss-Plattform (*JBoss® Platform*). Dabei wird vor allem Unterstützung im Zusammenhang mit Office-Dokumenten und ihrer Versionierung gegeben. Darüber hinaus wird jBPM (*Java Business Process Machine (jBPM)*) für Änderungs- und Freigabe-Workflows im System verwendet. Durch ihre modulare Struktur und die verfügbare Dokumentation, die explizit auf Erweiterbarkeit ausgerichtet ist, können neue Funktionalitäten einfach in die Systeme integriert werden. Eine Unterstützung für digitale Produktmodelle oder eine CAD-Anbindung ist nicht vorhanden.

Abbildung 3.1 fasst die wichtigsten Funktionalitäten der untersuchten PDM-Systeme und DMS zusammen. Dabei decken die hell hinterlegten Kriterien des Dokumentenmanagements und der Workflow-Unterstützung die wesentlichen Funktionalitäten der untersuchten DMS Alfresco™ und Nuxeo EP™ ab. Diese Funktionalitäten werden auch von den untersuchten PDM-Systemen unterstützt. Zusätzlich bieten diese Systeme jedoch ein breites Spektrum an Funktionalität zur Verwaltung von digitalen Produktmodellen mit einer Anbindung an CAD-Werkzeuge, wobei insbesondere die Werkzeuge des jeweiligen Herstellers (z.B. PTC Windchill® und Pro/ENGINEER) unterstützt werden.

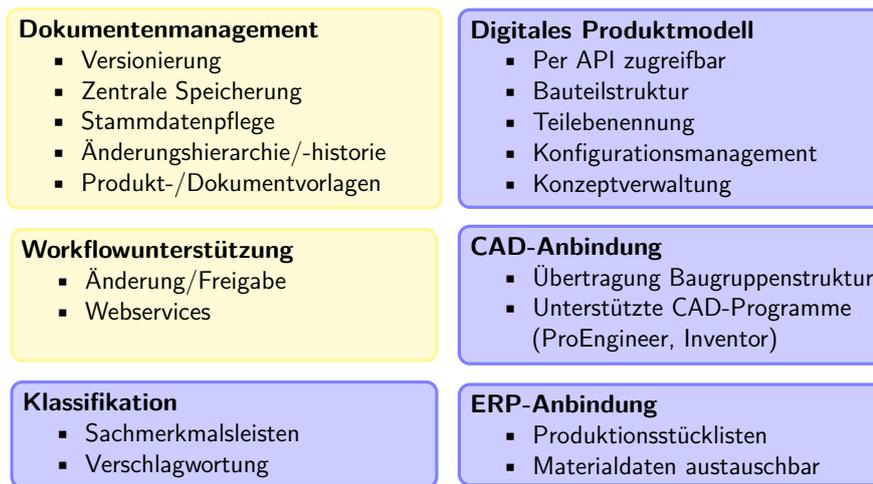


Abbildung 3.1: Wesentliche Merkmale der untersuchten PDM-Systeme (dunkel und hell hinterlegt) und DMS (hell hinterlegt).

3.6 Erweiterungsmöglichkeiten der untersuchten Systeme

In diesem Abschnitt wird erörtert, welches Potential die evaluierten Systeme für die Entwicklung eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems besitzen, das zusätzlich zu den in Abbildung 3.1 genannten Funktionalitäten den Konstrukteur bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte unterstützt und Methoden zur Analyse, Synthese und Bewertung der Energieeffizienz des Produkts bereitstellt. Für das zu entwickelnde Softwaresystem ergeben sich drei Möglichkeiten, um energiesensitive Erweiterungen bereitzustellen:

1. Verwendung eines bestehenden kommerziellen PDM-Systems und Erweiterungen für Energieeffizienz;
2. Erweiterung eines Open-Source DMS um die benötigte PDM-Funktionalität und für Energieeffizienz;
3. Neuentwicklung eines IT-Systems für PDM und Energieeffizienz.

Vergleicht man den Entwicklungsaufwand der drei Möglichkeiten, so kann die Verwendung eines bestehenden PDM-Systems als geeignetster Ausgangspunkt betrachtet werden, da die Verwaltung des digitalen Produktmodells und die Anbindung an CAD-Werkzeuge vom System übernommen werden. Von den vier untersuchten PDM-Systemen wird nur aras INNOVATOR[®] als Open-Source-Projekt im Kern betrieben. Allerdings sind wesentliche PDM-Merkmale einer kommerziellen Variante vorbehalten, so dass kaum ein Unterschied zu den anderen kommerziellen Systemen zu erkennen ist. Der Autodesk Data Management Server tritt als Erweiterung des kommerziellen CAD-Systems AutoDesk Inventor[®] auf, wobei wiederum die

Mehrzahl der PDM-Funktionen nur in einer separat zu erwerbenden Komponente verfügbar sind.

Die Erweiterung eines Open-Source DMS bietet aus Entwicklungssicht eine flexible Möglichkeit, Aspekte der Energieeffizienz in das Dokumentenmanagement zu integrieren. Allerdings muss dazu auch die Unterstützung für ein digitales Produktmodell realisiert werden, was einen nicht unerheblichen Mehraufwand mit sich bringt, jedoch keine wissenschaftlich neuen Erkenntnisse liefert. Für eine prototypische Realisierung kann diese Möglichkeit erwogen werden.

Eine Neuentwicklung eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems ist durch den hohen Entwicklungsaufwand eines vollständigen Systems kaum möglich. Jedoch könnten mit dieser Methode Teilaspekte realisiert werden, die zu einem späteren Zeitpunkt in ein bestehendes DMS oder PDM-System integriert werden können.

Ein wesentlicher Aspekt für die Entwicklung eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems ist der Einsatz von Workflows zur Realisierung der Methoden für die energieeffiziente Entwicklung von Produkten. Sowohl die betrachteten PDM-Systeme als auch die DMS bieten Unterstützung für das Workflow-Management. Meist beschränkt sich die Funktionalität auf Geschäftsprozesse, die im Zusammenhang mit einer Aufgabe auszuführen sind. So können Dokumentenänderungs- oder Freigabe-Workflows definiert werden und externe Applikationen mittels Webservice eingebunden werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die interne Workflow-Engine und die zu Grunde liegende Workflow-Beschreibungssprache ausreichend Erweiterungs- und Zugriffsmöglichkeiten bietet, um den vollständigen Produktentwicklungsprozess abzubilden. Diese Frage wird in Abschnitt 4.2 eingehender diskutiert.

3.7 Anforderungen an ein energiesensitives Datenmanagement

Aus der Betrachtung der Funktionalität eines PDM-Systems und den Eigenschaften der angeschlossenen Teilsysteme ergeben sich eine Reihe an Anforderungen für das Datenmanagement. Dabei sollen die Aspekte der Verwaltung betrachtet werden, die zusätzlich realisiert werden müssen, um ein energiesensitives System zur Produktentwicklung zu realisieren. Dazu gehören:

- Erweitertes digitales Produktmodell (Einbeziehung/Referenzierung von Energiedaten);
- Generierung von Identifikationsschlüsseln (eindeutigen Teilenummern);
- Zentrale Verwaltung von Energiedaten und -kenngrößen;
- Versionierung von Dokumenten und Dokumentstrukturen;
- Anbindung von CAx-Applikationen;

- Definition eines Standards für Datenaustausch mit anderen Systemen;
- Möglichkeit zur Dokumentation des Entwicklungsprozesses.

Die Erweiterung des Produktmodells um Energiedaten und -kenngrößen stellt die zentrale Komponente eines energiesensitiven Produktentwicklungssystems dar. Dabei stellen die Energiedaten des Produktmodells die Grundlage zur Bewertung der Energieeffizienz eines Produkts dar. Zusätzlich sollten im Produktentwicklungssystem geeignete Methoden bereitgestellt werden, die eine (semi-)automatische Erzeugung der Energiedaten aus Kenngrößen und gegebenen Daten ähnlicher Produkte, unter Einbeziehung des gesamten Produktlebenszyklus, ermöglichen.

4 Abbildung von Produktentwicklungsprozessen durch Workflows

In der Produktentwicklung ist ein strukturiertes Vorgehen die Basis für den Entwurf kostengünstiger und energiesparender Produkte. Die Abbildung von (Teil-)Prozessen der Produktentwicklung auf ausführbare Workflows bildet eine wesentliche Grundlage für die IT-Unterstützung einer strukturierten Vorgehensweise. Dazu werden in diesem Kapitel zunächst Geschäfts- und Entwurfsprozesse voneinander abgegrenzt und die Relevanz von wissenschaftlichen Workflows, Geschäftsworkflows und Prozessketten für den PEP untersucht. Anschließend werden Anforderungen an ein Workflow-Managementsystem (WfMS) zur IT-Unterstützung eines PEPs vorgeschlagen.

4.1 Gegenüberstellung von Geschäftsprozessen und Entwurfsprozessen

Prozesse sind sowohl in der Business-Domäne als auch in der Produktentwicklung und Produktfertigung Grundlage für ein strukturiertes Vorgehen. Dabei unterscheidet sich die jeweilige Sichtweise bzw. Definition eines Prozesses deutlich. Die folgende Übersicht beschreibt die Sichtweise des Ingenieurs auf die Domänen (nach Vajna u. a. 2009):

Geschäftsprozesse,

Fertigungsprozesse

- Prozesse fixiert, starr, müssen 100% reproduzierbar, überprüfbar sein
- Resultate sind vorhersehbar
- Material, Technologien und Werkzeuge sind in Fertigung physisch vorhanden und vollständig beschrieben

Entwurfsprozesse

- Prozesse dynamisch, kreativ, chaotisch, viele Schleifen und Sprünge
- Resultate nicht immer vorhersehbar
- Basiert auf virtuellen Objekten, oft nicht präzise: Konzepte, Ideen, Entwürfe, Ansätze, Versuche

- Dynamische Änderungen nicht vorgesehen
- Störungen im Prozess sind explizit beschrieben (Fehlerfälle)
- Dynamische Reaktionsfähigkeit wird benötigt
- Hohe Wahrscheinlichkeit für Störungen auf Grund fehlerhafter Definitionen und Änderungswünsche

Zur Abbildung eines PEP auf ausführbare Workflows muss vor allem die Dynamik der Prozesse geeignet erfasst werden, um dem Konstrukteur die notwendige Flexibilität bei der Entwicklung zuzusichern. Die Wahl einer geeigneten Entwicklungsmethodik stellt hierfür die Grundlage dar. Aus jetziger Sicht stellt die Property-Driven Design-Methodik nach Vajna u. a. 2009 einen geeigneten Ausgangspunkt dar.

4.2 Workflow-Management im Produktentwicklungsprozess

Workflowkonzepte bilden einen zentralen Bestandteil eines Softwaresystems zur IT-Unterstützung eines PEPs. Alle Prozesse im PEP können in einem solchen System mit Hilfe von Workflows realisiert werden. Dabei müssen folgende Arten von Prozessen aus verschiedenen Domänen einbezogen werden.

- Geschäftsprozesse: z.B. Freigabe-, Änderungsworkflows von Dokumenten;
- Wissenschaftliche Workflows: z.B. Grid Workflows, Berechnungs- und Transformationsworkflows;
- Prozessketten: z.B. Herstellungsprozess.

Innerhalb dieser drei Anwendungsgebiete haben sich eigenständige Beschreibungssprachen herausgebildet, die entweder die Business-Domäne, die wissenschaftliche Domäne bzw. die Fertigung betonen. Beispielsweise eignet sich die Business Process Execution Language (BPEL) gut für die Beschreibung automatischer Prozesse, in denen Webservices orchestriert werden. Aktuelle BPEL-Engines können mit BPEL modellierte Workflows mit einigen Einschränkungen direkt ausführen. Sprachen aus dem Bereich der Grid Workflows sind eher für verteilte Berechnungen auf heterogenen Plattformen konzipiert, können aber auch Webservices integrieren. Durch die Spezialisierung auf Berechnungsfunktionen ist eine automatisierte, skalierbare Ausführbarkeit der Workflows gewährleistet. Als Beispiel wäre die Simple Conceptual Unified Flow Language (SCUFL)¹ zu nennen, die vom System Taverna im Bereich der Bioinformatik eingesetzt wird. Manuelle Aufgaben, d.h. eine Unterbrechung des Workflows, sind sowohl in BPEL als auch bei Grid Workflows nicht vorgesehen. Prozessketten werden aktuell hauptsächlich zur Visualisierung verwendet, um bspw. Abläufe in einer Fabrik darzustellen. Die Spezifikationsprachen der

¹<http://www.gridworkflow.org/snips/gridworkflow/space/SCUFL>

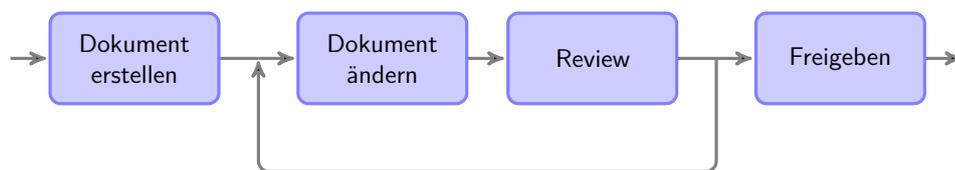
Prozessketten im Maschinenbau sind kaum standardisiert. Eine Ausnahme bilden die Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK).

Auch im Bereich der Geschäftsprozesse existieren verschiedene grafische Spezifikationsprachen, z.B. die Business Process Modeling Notation (BPMN), die umfangreiche Modellierungsmöglichkeiten (inkl. manueller Aufgaben) bieten und gut für die Definition von Schnittstellen und zur Aufgabenzuweisung genutzt werden können. Jedoch sind diese Spezifikationsprachen nur zur graphischen Modellierung zu verwenden und müssen in eine (meist eingeschränkte) ausführbare Workflow-Beschreibungssprache übertragen werden, bevor sie von einem Workflow-Managementsystem abgearbeitet werden können.

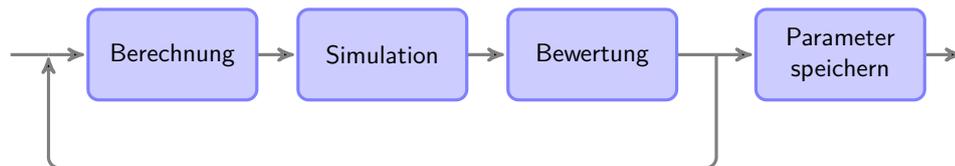
Dieser kurze Abriss soll die Komplexität der Aufgabenstellung verdeutlichen, ein geeignetes WfMS mit einer entsprechenden Beschreibungssprache für die Modellierung eines PEP zu finden. Einerseits ist dabei die Abbildung automatischer, oft iterativer Prozesse auf Workflows wichtig. Andererseits stehen auch Entscheidungen, die nur der Konstrukteur treffen kann, (manuelle Aufgaben) im Vordergrund.

Bei der Abbildung eines PEP wurden drei wesentliche Anwendungsgebiete identifiziert, in denen Workflows eingesetzt werden können. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils stark vereinfachte Beispiele unter Vernachlässigung von Verzweigungen und Schleifen:

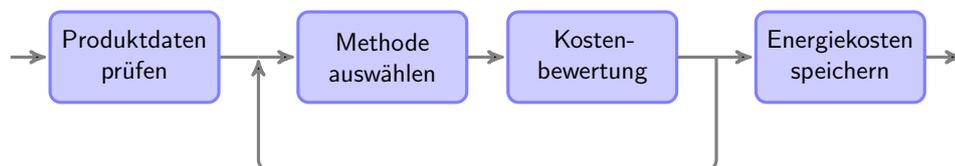
- Freigabe- und Änderungsworkflows



- CAx-Prozessketten



- Workflows zur Energiekostenrechnung



Zur Abbildung der beschriebenen Anwendungsgebiete im PEP muss eine geeignete Modellierung gewählt werden. Dabei können Prozesse, die eine Methode eines Anwendungsgebiets repräsentieren, als eigenständige Workflows spezifiziert werden. Ein übergeordneter „Entwicklungsprozess“ steuert dabei den Aufruf einer gewählten Methode.

4.3 Anforderungen an ein Workflow- Managementsystem (WfMS)

Zur Realisierung eines PEP durch Workflows können die Phasen eines PEP als übergeordneter Workflow und konkrete Vorgehensweisen innerhalb der Phasen (bspw. eine ABC-Analyse oder eine Finite Elemente Simulation) als Subworkflows beschrieben werden. Daraus leiten sich die folgenden Anforderungen an ein WfMS ab:

- Die Workflow-Abarbeitung sollte dynamisch und flexibel gestaltbar sein.
 - Für ein Projekt sollte vorher festlegbar sein, welche Stationen eines PEP zu durchlaufen sind;
 - Das WfMS sollte Ad-hoc Workflows, d.h. die Möglichkeit zur Änderung der Workflow-Spezifikation während der Ausführung des Prozesses, für die notwendige Dynamik eines PEP unterstützen;
 - Es sollte eine parallele und kollaborative Bearbeitung möglich sein (Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering);
- Integration von CAx-Werkzeugen zur Modellbildung und Simulation.
 - Der Zugriff auf Ein- und Ausgabedokumente aus FEM, MKS, CFD, etc. über die Komponenten der Produktstruktur sollte unterstützt werden;
 - In jeder Phase des PEP sollte der Zugriff auf die Dokumente gestattet werden (domänenunabhängig nach VDI 2206);
 - Die Kombination von Funktionalitäten verschiedener CAx-Werkzeuge sollte unterstützt werden;
 - Die Spezifikation von TOTE-Zyklen (Test-Operate-Test-Exit) zur schrittweisen Verbesserung und Validierung sollte in der Workflow-Beschreibungssprache möglich sein.

Auf dem Gebiet der WfMS gibt es durchaus vielversprechende Ansätze, die einen Großteil der o.g. Anforderungen erfüllen. Ein Beispiel ist das Konzept der Process Virtual Machine (PVM) nach Baeyens und Faura 2007. Die damit verbundene Abstraktion der Komponenten zur Ausführung des Workflows soll es erlauben, eine Vielzahl von Workflow-Beschreibungssprachen auf der PVM auszuführen sowie eigene Domain Specific Workflow Language zu erzeugen. Die Realisierung der PVM erfolgt über das WfMS *Java Business Process Machine (jBPM)*, das sich zur Abbildung eines PEP gut eignet. Wie die o.g. Anforderungen zeigen, gilt es einen Mittelweg zwischen fest vorgegebenen und dynamischen, wenig strukturierten Abläufen zu finden.

5 Modellierung beispielhafter Prozesse der Produktentwicklung

Ein möglicher Ansatz zur Modellierung eines PEP besteht darin, Prozesse der Produktentwicklung mit Hilfe von BPMN darzustellen. Auf diese Weise können Aussagen über generelle Merkmale eines Entwicklungsprozesses gefunden werden. So könnte eine Neukonstruktion wie in Abbildung 5.1 in BPMN-Notation modelliert werden.

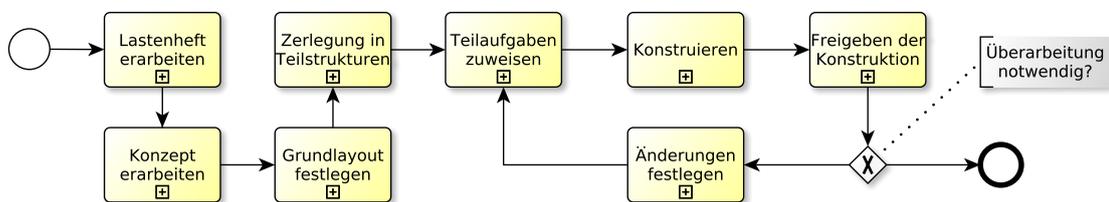


Abbildung 5.1: Vereinfachte Modellierung eines PEP in BPMN-Notation in Anlehnung an die Entwicklungsmethodik VDI 2221.

Aus den Untersuchungen der Entwicklungsmethodiken und der Evaluation der PDM-Systeme kann gefolgert werden:

- Eine Reihe von Teilprozessen des PEP kann sequenziell abgebildet werden;
- Verschiedene Tätigkeiten des PEP (z.B. Konstruieren) zeichnen sich durch Nebenläufigkeit und Dynamik in der Ausführung aus;
- Oftmals findet eine kontinuierliche Verfeinerung (top-down) der Produktstruktur in mehreren Iterationsschritten statt.

Im folgenden sollen beispielhaft zwei Teilprozesse der Produktentwicklung in BPMN-Notation dargestellt werden. Anschließend soll ein Ansatz zur Beschreibung eines energiesensitiven PEPs durch Workflows basierend auf dem PDD-Ansatz von Neugebauer u. a. 2009 vorgestellt werden.

5.1 Erstellung einer Anforderungsliste

Die Erstellung einer Anforderungsliste beschreibt den Prozess, aus Kundenanforderungen die Eigenschaften des gewünschten Produkts abzuleiten. Dabei müssen

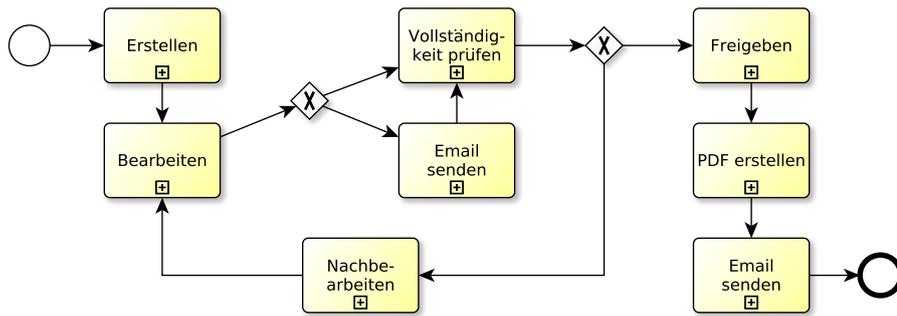


Abbildung 5.2: Erstellung einer Anforderungsliste als Workflow in BPMN-Notation.

häufig Anforderungen konkretisiert bzw. verfeinert werden. Nach Möglichkeit sollten die formulierten Eigenschaften eine quantitative Bewertung zulassen, um erreichte Produkteigenschaften messbar zu machen. In Abbildung 5.2 ist der Workflow der Anforderungsliste auf Grundlage von Lindemann 2007 in BPMN-Notation abgebildet.

Zunächst erstellt der Konstruktionsleiter eine initiale Anforderungsliste zusammen, in der die Kundenanforderungen übernommen werden (*Erstellen*). Zur Ausarbeitung werden die Anforderungen an verschiedene Konstrukteure verteilt, die die zugewiesenen Anforderungen verfeinern und quantifizieren (*Bearbeiten*). Nachdem die Konstrukteure die Anforderungen konkretisiert haben, überprüft der Konstruktionsleiter die Vollständigkeit und Güte der Anforderungsliste und kann unzureichende Anforderungen an den Konstrukteur zurückgeben (*Vollständigkeit prüfen*). Nach Möglichkeit kann der gegenwärtige Stand der Liste per Email an Interessierte versendet werden (*Email senden*). Sind alle Anforderungen vollständig, so gibt der Konstruktionsleiter die Liste frei, so dass keine Änderungen mehr vorgenommen werden können (*Freigeben*). Abschließend wird aus der Liste ein Dokument generiert, das dem Kunden und dem Management präsentiert werden kann (*PDF erzeugen, Email senden*).

Der beschriebene Workflow zur Erstellung einer Anforderungsliste wurde mit der Workflow-Beschreibungssprache jPDL umgesetzt und kann auf einem jBPM Workflow-Managementsystem (in Version 4.1) abgearbeitet werden. Als Prototyp zur Nutzerinteraktion wurde ein webbasiertes System auf Basis der *JBoss® Platform* gewählt, das die Anforderungsliste mit einer PostgreSQL-Datenbank¹ verwaltet. Gegenüber der üblicherweise eingesetzten Textwerkzeuge zur Erzeugung einer Anforderungsliste (inkl. des Versands per Email), bietet das webbasierte System den Vorteil, dass die Synchronisation des Dokuments nach der Zuteilung an verschiedene Bearbeiter durch den Einsatz der Datenbank entfällt. Zudem kann sichergestellt werden, dass der Bearbeiter nur Änderungen an den zugeweilten Anforderungen vornimmt.

¹<http://www.postgresql.de/> - Relationale Open Source Datenbank

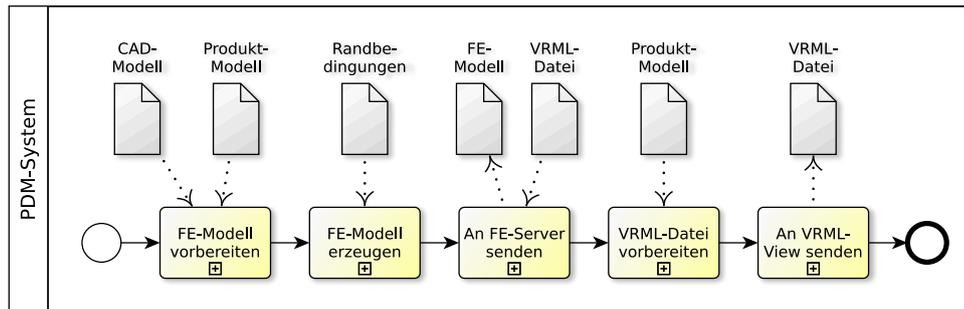


Abbildung 5.3: Workflow zur Durchführung einer Finite Elemente Simulation. Zusätzlich zu den Schritten der Simulation sind die wesentlichen Ein- und Ausgabedokumente oberhalb der Schritte abgebildet.

5.2 Workflow einer Finite Elemente Simulation

Ein Anwendungsbeispiel für einen CAx-Workflow ist eine Finite Elemente Simulation eines CAD-Modells. Dabei stehen die Extraktion/Konvertierung von Daten und die Integration verschiedener beteiligter IT-Systeme im Vordergrund. Der wesentliche Vorteil der Verwendung von Workflows ist dabei die automatische Abarbeitung von Teilaufgaben (z.B. Datenkonvertierung mit geeignetem Konverter), die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Quellen (CAD, Produktdaten, FE-Parameter) und die Möglichkeit zur Nutzung externer IT-Systeme für spezielle Aufgaben (z.B. Durchführung der Finite Elemente Simulation). Abbildung 5.3 zeigt den Ablauf einer FE-Berechnung, wie er mit einem klassischen FEM-Werkzeug (z.B. Ansys²) durchgeführt wird. Der Workflow beginnt mit der Vorbereitung des FE-Modells (*FE-Modell vorbereiten*), indem die zu simulierende Elemente aus dem Produktmodell extrahiert und deren geometrische Eigenschaften aus dem CAD-Modell ermittelt werden. Ein vollständiges FE-Modell besteht aus der Netzstruktur (Finite Elemente), das aus den geometrischen Eigenschaften abgeleitet werden kann und aus Randbedingungen, die bspw. Kräfte, die auf das Modell wirken, beschreiben (*FE-Modell erzeugen*). Im dritten Schritt wird das FE-Modell an die Simulationssoftware übermittelt (*An FE-Server senden*). Als Ergebnis werden häufig Verschiebevektoren aller Finiten Elemente zurückgeliefert, die für eine visuelle Darstellung mit dem Produktmodell bzw. dem Ausschnitt des CAD-Modells verknüpft werden müssen (*VRML-Datei vorbereiten*³). Zur Darstellung des Simulationsergebnisses wird die VRML-Datei an ein geeignetes Ausgabegerät gesendet (*An VRML-View senden*).

²<http://www.ansys.com/> – Softwarewerkzeug für allgemeine Finite Elemente Simulationen

³VRML - Virtual Reality Modeling Language, Beschreibungssprache für 3D Szenen

5.3 Workflow eines energiesensitiven Produktentwicklungsprozesses

Ausgehend von den Betrachtungen zu Methodiken der Produktentwicklung in Kapitel 2 und Anforderungen an ein Workflow-Managementsystem zur Produktentwicklung in Abschnitt 3.4, wurde der energiesensitive PEP nach Neugebauer u. a. 2009 auf Basis des Property-Driven Design (PDD) verwendet, um ein hierarchisches Modell zu entwerfen. Dabei geben die Analyse-Synthese-Zyklen einen übergeordneten Workflow vor, bei dem der Konstrukteur in jedem Prozessschritt eine geeignete Methode (Subworkflow) wählen kann. Soll beispielsweise eine Simulation oder eine Optimierung erfolgen, so beschreibt ein Subworkflow den Ablauf des Erzeugens oder Abrufens der Eingabedaten, mögliche Konvertierungen der Eingabedaten, den Aufruf des CAx-Tools (z.B. eine Finite-Elemente Simulation) und die Bearbeitung und Visualisierung der Ausgabedaten. Der Subworkflow kann dabei sowohl automatische Schritte als auch manuelle Schritte beinhalten.

Abbildung 5.4 zeigt den übergeordneten Workflow anhand der allgemeinen PDD-Schritte und zugehörige Subworkflows, die die Energieeffizienz des Produkts sicherstellen sollen.

- (1) Der übergeordnete Workflow beginnt mit der Festlegung der Eigenschaften (properties) des Produkts basierend auf den Anforderungen des Kunden (häufig in einer Anforderungsliste zusammengefasst). Dabei werden die Anforderungen hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Kunden, für die Produktions- und Betriebskosten und hinsichtlich der Aspekte der Energieeffizienz analysiert. Die Energieeffizienz eines gegebenen Produkts stellt dabei ein Schlüsselkriterium des Verifikationsschritts dar und wird daher als eigenständige Eigenschaft betrachtet. Der übergeordnete Workflow spiegelt die typischen Analyse-Synthese-Zyklen des PDD wieder. Zur Überprüfung inwieweit die aktuell festgelegten Merkmale (characteristics) die geforderten Eigenschaften erfüllen, folgt am Ende jedes Analyse-Synthese-Zyklus ein Verifikationsschritt, der die Konsistenz der Daten für weitere Iterationen sicherstellt.
- (2) Der Analyseschritt wird als Subworkflow mit vier Teilschritten abgebildet. Zunächst werden die Baugruppen identifiziert, die wesentlich zum Energieverbrauch der Maschine beitragen. Im Subworkflow werden die Baugruppen hinsichtlich ihres Energieverbrauchs klassifiziert und es werden Energieflüsse zwischen den Baugruppen bewertet. Abschließend kann für einzelne Baugruppen eine weitere detailliertere Betrachtung der Bestandteile der Baugruppe notwendig sein, was zu einer weiteren Iteration des Subworkflows führt.
- (3) Die identifizierten Energieflüsse zwischen den Baugruppen stellen die Eingabe für die folgenden Synthese-Schritte dar. Dabei werden die Parameter der Baugruppen und damit die verbundenen Energieflüsse durch die folgenden Herangehensweisen angepasst: Zunächst wird untersucht, ob der betrachtete Energiefluss beseitigt werden kann (z.B. aktive Kühlung durch Kühlrippen



Abbildung 5.4: Hierarchischer Workflow des energiesensitiven PEP für Werkzeugmaschinen.

ersetzen). Ist dies nicht möglich, wird untersucht, ob eine Regelung der Komponente zu Einsparungen des Energieverbrauchs führen kann (energy-on-demand). Weiterhin können die Wirkprinzipien der Baugruppe verändert werden und die Möglichkeiten der Rückführung von Energie (z.B. die Nutzung von Abwärme) untersucht werden, um den Gesamtenergieverbrauch zu senken.

- (4) Ein Vergleich zwischen geforderten und den gegenwärtig erreichten Eigenschaften (Soll-Ist-Vergleich) ist die Hauptaufgabe des Verifikationsschritts. Hier kommen CAx-Werkzeuge, z.B. Finite Elemente Simulationen, zum Einsatz, um aus den in den Synthese-Schritten geänderten Merkmalen die erreichten Eigenschaften abzuleiten. Dabei werden virtuelle Prototypen erzeugt, die die Ergebnisse der aktuellen Iteration widerspiegeln. Zur Betrachtung der Energieeffizienz können Indikatoren wie ein Energieeffizienz-Index oder Berechnungen/Abschätzungen des Energieverbrauchs über den gesamten Lebenszyklus des Produkts herangezogen werden.
- (5) Wird durch die Anpassungen der Parameter eine Reduktion des Energieverbrauchs einer Baugruppe erreicht, so müssen die Auswirkungen der Veränderungen des Bauteils auf das gesamte Produkt abgewogen werden. Dazu

werden zunächst integrierte Unterbaugruppen und später das gesamte Produkt betrachtet.

Der vorgeschlagene hierarchische Workflow in Abbildung 5.4 kann durch ein Workflow-Managementsystem ausgeführt werden, indem Entscheidungsknoten zur flexiblen Auswahl von Subworkflows zur Workflow-Beschreibungssprache hinzugefügt werden. Das Workflow-Managementsystem soll den Konstrukteur bei der Auswahl geeigneter Methoden und zugehöriger Daten unterstützen und die Dokumentation des Entwicklungsprozesses ermöglichen. Mit einer Integration des Workflows in ein service-orientiertes IT-System, kann dem Konstrukteur eine einheitliche Schnittstelle zum Zugriff auf Daten in externen IT-Systemen angeboten werden.

6 Zusammenfassung

Eine Methodik zur Entwicklung energieeffizienter Produkte erfordert die Einbeziehung des gesamten Produktlebenszyklus in den Entwicklungsprozess. Dabei müssen Prozesse zur Reduktion des Energieverbrauchs integriert und die Konzepte zur Bewertung von Alternativlösungen aufgezeigt werden. Darüber hinaus müssen die Abläufe der Dynamik eines Entwicklungsprozesses angepasst sein, sodass flexibel auf Anforderungsänderungen in Entwicklung und Konstruktion reagiert werden kann und die Kreativität des Entwicklungsprozesses möglichst wenig einschränkt wird. In diesem Bericht wurden aus diesem Grund mehrere Entwicklungsmethodiken evaluiert. Die Richtlinien 2221 und 2206 des VDI schränken die Flexibilität des Entwicklungsprozesses aus Konstrukteursicht entweder ein oder sind zu allgemein, um für die konkreten Prozesse genutzt zu werden. Dieses Defizit wird u. a. von der Methodik des Property-Driven Design (PDD) aufgegriffen, die den Entwicklungsprozess als wiederkehrende Zyklen aus Analyse und Synthese des Produkts bzw. seiner Teile abbildet. Neugebauer u. a. 2009 stellen eine Erweiterung des PDD-Ansatzes um Konzepte zur Reduktion des Energieverbrauchs vor. Dieser Ansatz wurde ausgewählt, um Anforderungen an Softwareunterstützung für einen energiesensitiven Produktentwicklungsprozess zu formulieren.

Für eine zeitgemäße IT-Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses ist die Integration verschiedener Softwarewerkzeuge notwendig, um Entwicklungszeit, Kosten und Energieverbrauch eines Produkts zu reduzieren und das Marktpotential des Produkts zu sichern. Die Zusammenführung von Kosten- und Energiedaten aus dem gesamten Lebenszyklus, wobei besonders der Betrieb des Produkts zu nennen ist, stellt sich als wichtige Entscheidungsgrundlage für die Entwicklung künftiger energieeffizienter Produkte dar. Für einen Überblick über aktuelle Softwarewerkzeuge der Produktentwicklung im Hinblick auf die Koordination der Daten wurden verschiedene Produktdatenmanagement- und Enterprise-Dokumentenmanagementsysteme untersucht und die notwendigen Maßnahmen zur Erweiterung der Systeme für eine energiesensitive Produktentwicklung ausgearbeitet.

Prototypisch werden ausgewählte Methoden der Produktentwicklung, die Erstellung einer Anforderungsliste und eine Finite Elemente Simulation, als Workflows in BPMN-Notation vorgestellt. Zusätzlich wird eine Abbildung des vollständigen Produktentwicklungsprozesses auf Basis der Property-Driven Design Methodik nach Neugebauer u. a. 2009 entwickelt. Dabei stellen die Analyse-Synthese-Schritte einen übergeordneten Workflow dar, in dem in jeder Phase konkrete Methoden (Subworkflows) gewählt werden können. Der hierarchische Ansatz kann eine Grundlage für die Realisierung eines IT-Systems zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte bilden.

7 Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard, Reiner Anderl und Herbert Birkhofer, Hrsg. (2005). *Environmentally-Friendly Product Development*. Springer London. ISBN: 978-1-85233-903-6 (Print) 978-1-84628-086-3 (Online). URL: http://dx.doi.org/10.1007/1-84628-086-9_1.
- Baeyens, Tom und Miguel Valdes Faura (2007). *The Process Virtual Machine*. <http://docs.jboss.com/jbpm/pvm/article/>. Mai 2007. URL: <http://docs.jboss.com/jbpm/pvm/article/>.
- Ehrlenspiel, Klaus (2009). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4., Auflage. Hanser Fachbuch. ISBN: 3446420134. URL: <http://books.hanser.de:8080/vkb/pubdisplay.jsf>.
- Eigner, Martin und Ralph Stelzer (2009). *Produktdaten-Management und Product Lifecycle Management*, S. 27–45. URL: http://dx.doi.org/10.1007/b93672_3.
- Goltz, Michael, Dirk Müller und Norbert Müller (2003). „PDM/PLM – Verwaltung von Produktdaten“. In: *ITZ Berichte* 1.Heft 4 (Apr. 2003). URL: http://www.gbv.de/dms/clausthal/H_BIB/ITZ/ITZ_Berichte/itz-03-04-02.pdf.
- Java Business Process Machine (jBPM)*. URL: <http://www.jboss.org/jbpm>.
- JBoss® Platform*. URL: <http://www.jboss.org/>.
- Lasi, Heiner (2007). „Aufbau eines IT-basierten Integrationskonzepts zur Unterstützung von Produktentwicklungs- und Produktionsprozessen“. Diss. Universität Stuttgart.
- Lindemann, Udo (2007). *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Springer Berlin Heidelberg. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-37451-0>.
- Neugebauer, Reimund u. a. (2009). „Approach for the Development of Energy-efficient Machine Tools“. In: *Journal of Machine Engineering* 9.2, S. 51–62. ISSN: 1895-7595.
- Pahl, Gerhard u. a. (2006). *Pahl/beitz Konstruktionslehre*. 7. Auflage. Springer, S. 799. ISBN: 3540340602, 9783540340607. URL: <http://www.springerlink.com/content/978-3-540-34060-7>.
- Ponn, Josef und Udo Lindemann (2008). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-68562-3 (Print) 978-3-540-68563-0 (Online). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68563-0>.
- Prof. H. Meerkamm, Dr.-Ing. K. Paetzold, Hrsg. (2008). *Bayerischer Forschungsverbund für Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung (FORFLOW)*. 2. Ergebnisbericht FORFLOW. Universität Erlangen-Nürnberg Konstruktionstechnik, S. 204.
- Roth, Karlheinz (2000). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Bd. 1+2. Springer, S. 473. ISBN: 3540670262, 9783540670261.

- Scheer, August-Wilhelm u. a. (2006). „IT-Bausteine einer prozessorientierten PLM-Lösung“. In: *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*. Springer Berlin Heidelberg. Kap. 6, S. 67–117. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-28442-7_6. URL: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-28442-7_6.
- Stark, John (2005). *Product Lifecycle Management*. ISBN: 978-1-84628-067-2. DOI: 10.1007/b138157. URL: http://dx.doi.org/10.1007/1-84628-067-2_1.
- Vajna, Sandor (2007). *Grundlagen der Modellierung von Prozessen in der Produktentwicklung*. URL: <http://www.pronavigate.de/inc/get.file.php?9>.
- Vajna, Sandor u. a. (2009). *CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. 2. A. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 3540360387. URL: <http://www.springerlink.com/content/978-3-540-36038-4>.
- VDI-Richtlinie 2206 (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Juni 2004.
- VDI-Richtlinie 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Mai 1993.
- Weber, Christian und Till Deubel (2003). „New theory-based concepts for PDM and PLM“. In: *International Conference on Engineering Design -- ICED 03*. URL: <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2008/1615/>.
- Weber, Christian, Horst Werner und Till Deubel (2002). „A different view on PDM and its future potentials“. In: *International Design Conference - Design 2002*. URL: http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2008/1611/pdf/A_Different_View_on_PDM_and_its_Future_Potentials.pdf.

A Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface.
BPEL	Business Process Execution Language.
BPMN	Business Process Modeling Notation.
CAD	Computer Aided Design.
CAE	Computer Aided Engineering.
CAM	Computer Aided Manufacturing.
CED	Cumulated Energy Demand.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
DMS	Dokumentenmanagementsystem.
DMU	Digital Mock-up.
DWF	Design Web Format, proprietäres 3D AutoCAD Format.
ECAD	Electronic Design Automation.
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette.
ERP	Enterprise Resource Planning.
ESB	Enterprise Service Bus.
FEM	Finite Elemente Methode.
GUI	Graphical User Interface.
MIPS	Material input per service unit.
MKS	Mehrkörpersystem (oder -simulation).
NC	Numerical Control, Steuergerät von Werkzeugmaschinen.
PDD	Property-Driven Design.
PDM	Produktdatenmanagement.
PEP	Produktentwicklungsprozess.
PKM	Product Knowledge Management.
PLM	Product Lifecycle Management (Produktlebenszyklusmanagement).
PVM	Process Virtual Machine.

SCUFL	Simple Conceptual Unified Flow Language.
SDK	Software Development Kit.
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung.
STEP	Standard for the exchange of product model data.
TOTE	Test-Operate-Test-Exit.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure.
VRML	Virtual Reality Modeling Language.
WfMS	Workflow Management System.
WZM	Werkzeugmaschine.

B Glossar virtuelle Produktentwicklung

CAx-Prozesskette Unter einer Prozesskette wird die formale, hierarchisch strukturierte Zusammenfassung von Informationsverarbeitungsprozessen (Erzeugung, Verarbeitung und Austausch von Informationen), die einem gemeinsamen Prozessziel dienen, verstanden. Bei der Verknüpfung und Interaktion von mehreren Prozessketten miteinander entstehen Prozessnetze. Diese Prozessnetze können mit dem englischen Begriff **Workflow** gleichgesetzt werden. Der Begriff „CAx-Prozesskette“ grenzt sich von „Prozessketten“ ab, wie sie etwa in der Fertigung anzutreffen sind. Beispiele für CAx-Prozessketten sind Technische Dokumentation (Generierung von Dokumenten, wie Stücklisten, Zeichnungen und Produktkataloge), Digitales Mock-Up (Geometriedaten und Zusatzinformationen aus dem digitalen Produktmodell werden benutzt, um ein DMU abzuleiten) und Berechnung/Simulation (Einbindung von Berechnungsprogrammen und Simulationen, um bestimmte Produkteigenschaften ohne physikalischen Prototyp zu bestimmen).

CAx-Werkzeuge Gesamtheit rechnergestützter Entwurfs- und Fertigungssoftware (Computer Aided Engineering (CAE), Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM), etc.).

Concurrent Engineering Concurrent Engineering (CE) bezieht sich nur auf die Phase „Entwicklung und Konstruktion“ des Engineering Prozesses. Dabei werden Aufgaben in Teilaufgaben zerlegt und die Teilaufgaben werden überlappt bearbeitet. Die Zerlegung basiert auf systemtechnisch-funktionalen Ansätzen (Fahrwerk, Chassis, Antrieb) oder auf strukturellen Ansätzen (System, Erzeugnis, Komponente, Baugruppe). Beispielsweise wird eine Automobilkarosserie an vielen Stellen gleichzeitig konstruiert. Die Konsistenz dieser parallelen Bearbeitung wird durch die Definition von Bauräumen, Gestaltungszonen und der damit verbundenen Schnittstellen und Referenzen sichergestellt. (nach Vajna u. a. 2009)

Design to energy-efficiency Bezeichnet die Berücksichtigung der Energieeffizienz in der Konstruktion eines Produkts, die Betrachtungen für den gesamten Lebenszyklus einschließt. Design to energy-efficiency stellt eine Spezialisierung des „Design for X“ Prinzips dar, wobei X mit einer konkreten Zielstellung (z.B. Quality, Production) ersetzt wird. Siehe auch Neugebauer u. a. 2009.

Enterprise-Dokumentenmanagement Rechnergestütztes Datenbank- und Kommunikationssystem zur Verwaltung (Speicherung, Versionierung, etc.) beliebiger Daten. Oftmals mit Projektverwaltungssoftware verbunden.

Integrierte Produktentwicklung Die integrierte Anwendung von ganzheitlichen und multidisziplinären Methoden, Verfahren, Organisationsformen sowie manueller und

rechnerunterstützter Werkzeuge unter minimierter und nachhaltiger Nutzung von Produktionsfaktoren und Ressourcen. Die integrierte Produktentwicklung umfasst alle Schritte von der Idee bis zur Serienfreigabe/Markteinführung eines Produktes oder einer Dienstleistung. Sie stellt den Menschen in den Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses und verfolgt das Ziel, Produkte oder Dienstleistungen hoher Qualität in angemessener Zeit und kostengünstig herzustellen. (nach Vajna u. a. 2009)

Lifecycle Assessment Systematische Analyse zur Bewertung der möglichen Auswirkungen eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Tätigkeit auf die Umwelt im Verlauf seiner gesamten Lebenszeit.

Product Lifecycle Management Ganzheitliche Betrachtung, Gestaltung und Verwaltung des Lebenszyklus eines Produkts. Aspekte und Einflüsse, die während des Produktlebens auftreten sollen frühzeitig erkannt und auf angemessene Weise berücksichtigt werden. (Vajna u. a. 2009) Einen umfangreichen Überblick gibt auch Stark 2005.

Produktdatenmanagement Rechnergestütztes Datenbank- und Kommunikationssystem zur Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung aller produktbeschreibenden Daten während des gesamten Produktlebenszyklus.

Produktmodell Das Produktmodell ist das digitale Abbild eines Produktes im Rechner. Das digitale Produktmodell dokumentiert gleichzeitig den Entwicklungsfortschritt mit den zugehörigen Produkteigenschaften und Merkmale (siehe PDD). Informationsmengen in einem Produktmodell sind Funktion und Gestalt des Bauteils, Ergebnisse aus Berechnung, Simulation und Test, Erzeugnisstrukturen (z.B. Stückliste), Darstellungen (z.B. Technische Zeichnung, Explosionszeichnungen), Vorgaben für die Fertigung (z.B. Arbeitspläne), Formen der Objektrepräsentationen (z.B. 2D oder 3D, geometrisches Modell oder Voxelmodell usw.) und Vorschriften für die Archivierung. (Vajna u. a. 2009)

Produktstruktur Die Erzeugnisstruktur (auch als „Erzeugnisgliederung“ oder „Produktstruktur“ bezeichnet) beschreibt die Teilelemente eines Erzeugnisses (Bauteile/Baugruppen) und setzt sie untereinander in Beziehung. Die Zuordnung der Elemente untereinander erfolgt beispielsweise durch Schnittstellen oder durch übergeordnete Produktmerkmale. (Vajna u. a. 2009) Der Begriff Produktstruktur wird auch als Überbegriff für Strukturen des Produktes auf verschiedenen Konkretisierungsebenen gebraucht. (Funktionsstruktur, Wirkstruktur, Baustruktur). (Ponn und Lindemann 2008)

Simultaneous Engineering Überlapptes (paralleles) Bearbeiten von unterschiedlichen Aufgaben (innerhalb des Lebenszyklus des Produkts) mit laufender Abstimmung des Fortschritts. Beispielsweise kann die Planung der Herstellungsprozesse in der Prozessplanung fast parallel zur Konstruktion erfolgen, wobei dabei ein gewisser Vorlauf der Konstruktion sein muss, damit Daten vorhanden sind, auf welche die Prozessplanung zugreifen kann. Die entscheidende Frage für die Parallelisierung von Aufgaben lautet: Wann sind die Ergebnisse der vorlaufenden Aufgabe soweit stabil, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung und die damit verbundenen Änderungskosten geringer sind als die Kosten, die durch zu spätes weiterarbeiten verursacht werden? (nach Vajna u. a. 2009, Glossar)

VDI 2206 Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zur Entwicklung domänenübergreifender mechatronischer Systeme.

VDI 2221 Klassische Methodik des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

Virtuelle Produktentwicklung Durchgehend rechnerunterstützte Produktentwicklung unter intensiver Anwendung von Simulations- und Absicherungsverfahren auf der Basis digitaler realitätsnaher Produktmodelle. Zu den Techniken, die zum Einsatz kommen, gehören CAx-Werkzeuge (z.B. 3D-CAD, CAE: FEM, MKS, CFD), fortgeschrittene Werkzeuge zur Visualisierung und Simulation, wie Virtual Reality und Augmented Reality sowie hardware-nahe Überprüfung von Fertigungsprozessen (CAM: Hardware-in-the-loop, NC-Simulation). Ziel ist die frühe Erarbeitung des Produkt- und Produktionswissens und damit das frühzeitige Erkennen von Produkteigenschaften sowie die drastische Reduzierung von physischen Prototypen.

Workflow Bei einem Workflow handelt es sich um die rechnerunterstützte Beschreibung eines Prozesses und aller dafür notwendigen Ressourcen. Damit kann ein Workflow auf einem Workflow-Managementsystem abgearbeitet werden, die alle notwendigen Softwarekomponenten enthält, um Workflows zu definieren, auszuführen und zu überwachen. Unter einem *Business Prozess* versteht man dagegen meist die Beschreibung von organisatorischen Abläufen im Unternehmen, die fest oder nur wenig verändert werden. Business Prozesse müssen erst noch in einen ausführbaren Workflow überführt werden müssen. In der Produktentwicklung ist im Gegensatz dazu der Begriff *Prozessnetz* zu finden, der andeuten soll, dass Vorgänge nicht fest verkettet oder starr ablaufen, sondern vielmehr dynamisch sind und eine maximale Verbindungsmöglichkeit zwischen den Aktivitäten oder Teilprozessen gewährleistet sein soll. Siehe auch CAx-Prozesskette.

C Bewertungskriterien von DMS und PDM-Systemen

In der folgenden Tabelle sind die gewählten Bewertungskriterien der Evaluation von DMS und PDM-Systemen dargestellt. Eine Bewertung mit 5 Sternen (★★★★★) bezeichnet eine hohe Relevanz für das energiesensitive Produktentwicklungssystem. Entsprechend weniger Sterne eine geringere Relevanz.

PDM Merkmale	Bewertung	Beschreibung
Dokumentenmanagement		
Ein-/Auschecken/Sperren	★★★★★	Dokumente lassen sich sperren und als lokale Kopie auschecken und wieder einchecken. Der Zugriff auf einzelne Versionen der Datei ist möglich.
Zentrale Speicherung der Dokumente mit Gültigkeit, Status und Version	★★★★★	Werden die Daten zentral abgelegt? Existieren Möglichkeiten zur Festlegung der Gültigkeit, von Status und Versionierung?
Unterstützte Dokumentformate	★★★	3D-Modelle, Zeichnungen, Word, Excel. Können die Dateien auch angezeigt werden?
Eingabe und Ändern von Stammdaten möglich	★★★★★	GUI / Formulare um Stammdaten direkt zu erzeugen und zu ändern sind vorhanden.
Erfassung der Dokumentstrukturen	★★★	In ein Dokument eingebettete Metadaten können gelesen und verarbeitet werden, z.B. Informationen aus Office Dateien.
Änderungshierarchien	★★★★★	Dokumente können in Beziehung gesetzt werden. Damit können Änderungshierarchien erzeugt werden. Zum Beispiel werden die Bauteile einer Baugruppe in Beziehung zueinander gespeichert, so dass beim Speichern der Baugruppe alle Teile gespeichert werden / eine neue Version erhalten. Daten können auch geklont werden, d.h. eine neue Baugruppe kann aus bestehenden Teilen kopiert werden, sie bekommen eine neue Version und Status.
Änderungshistorie erfassen	★★★★★	Darstellen der Änderungen, Kommentare usw.
Projekt-/Dokumenttemplates	★★★★★	Es können Vorgabedokumente bzw. -projekte mit zugehörigen Dokumentvorgaben angelegt werden, die als Schablone für ein neues Dokument oder auch Projekt dienen können
Richtlinien zur Benennung	★★★★★	Dokumente erhalten mittels Namensschema eindeutige Bezeichnung
Zugriffsverwaltung	★	Man kann definieren, wer welche Dokumente lesen, ändern oder erzeugen darf
Volltextsuche	★★★	In den abgelegten Dokumenten und Metainformationen kann nach bestimmten Stichworten gesucht werden. Ein automatisch aufgebauter Index beschleunigt die Suche.
Office-Integration	★★★	Verwaltung von Office-Dokumenten ist über das PDM möglich. Sie werden versioniert abgelegt, können direkt in der Office-Anwendung geöffnet und bearbeitet werden sowie die Verknüpfung mit Modellen wird unterstützt.
Kommunikationsschnittstellen	★★★★★	E-Mail können manuell und automatisch versendet werden, Links zu Dokumenten im PDM können angefügt werden. Instant Messaging wird unterstützt.
Archivierung	☆	Dokumente können in einem Format für die Langzeitspeicherung auf externe Datenträger abgelegt werden.
Druckmanagement	★	Das System hilft beim erstellen von technischen Dokumentationen, indem automatisch alle relevanten Dokumente zusammengefasst, Metainformationen bereitgestellt und unterschiedliche Ausgabeformate zur Verfügung gestellt werden.
Produktmanagement		
Digitales Produktmodell vorhanden zugreifbar (API, DB)	★★★★★	SDK oder API mit dem man Plugins o.ä. zum Abgreifen des Produktmodells hat
Teileverwaltung und Bauteilstrukturierung	★★★★★	Man hat einen Teilekatalog und kann Bauteilstrukturen definieren.
Ableiten, Editieren von Stücklisten	★	Aus den freigegebenen Konstruktionsdaten können automatisch Stücklisten abgeleitet werden. Eher für Fertigung, Produktionsplanung, Einkauf wichtig.
Generierung von eindeutigen Teilenummern	★★★★★	Teile oder Produkte erhalten eindeutige Ids
Varianten eines Produkts, Bauteils	★★★★★	Man kann anhand von Versionen bestimmter Teile oder Baugruppen verschiedene Varianten des Produkts/Bauteils unterscheiden.
Versionierung von Stücklisten	★	Eine Stückliste hat eine Version
Konzeptverwaltung	★★★★★	Wird bereits der Produktentwicklungsprozess in der Konzeptphase unterstützt? Dokumente, Skizzen und Entscheidungen über ein Konzept sind im Nachhinein nachvollziehbar.
Alternativteile	★★★	Das System verwaltet Bauteile die alternativ für ein bestimmtes Teil (gleiche Funktionalität) verwendet werden können. Es können einzelne Teile ausgetauscht werden oder alle Vorkommen des Teils.

PDM Merkmale	Bewertung	Beschreibung
Klassifikation		
Merkmale, Sachmerkmalsleisten	★★★★★	Teile werden anhand von Merkmalen klassifiziert. Sachmerkmalsleisten fassen wichtige Merkmale zusammen. Eine Teilehierarchie ist vorhanden oder kann aufgebaut werden. (Zuordnung zu Teilfamilien)
Verschlagwortung, Taxonomie der Teile	★★★★★	Zu einem Objekt werden Metainformationen hinterlegt, anhand derer man zugehörige Dokumente finden kann. Über Wörterbücher oder Thesauri können die Kategorien für die Stichwörter festgelegt werden.
CAX Schnittstelle		
Übertragung der Baugruppenstruktur	★★★★	Ja nachdem, ob die Teile im CAD-Modell als einzelne Dateien oder in einer Datei zusammen verwaltet werden, ist eine direkte Übertragung ins PDM möglich. Das Produktmodell im PDM wird entsprechend aktualisiert.
Sachmerkmale werden automatisch an das PDM übertragen	★	Die CAD-PDM Schnittstelle aktualisiert beim Speichern Sachmerkmalsfelder anhand von Maßwerten.
PDM-Metadaten werden an das CAD-System übermittelt	★★	Zusatzinformationen wie Änderungsdaten, Version oder Freigabe werden an das CAD-Programm übermittelt und können dort, z.B. in einer Montagezeichnung benutzt werden
Zugriff auf Versionen von Baugruppen, Teilen Zeichnungen	★★	Einzelne Baugruppen oder Teile können im CAD-System durch andere Versionen selbiger ausgetauscht werden.
Vergleichen	★★	Lokale Änderungen können mit dem im Repository gespeicherten Modell verglichen werden.
CAD-Programme	★★★★	Ist von Pro Engineer, Inventor, SolidWorks aus Zugriff möglich? Daten können am besten direkt von der CAD-Applikation aus verändert werden. Ist die Schnittstelle im Paket enthalten oder kostet sie extra?
Neutrale Datenformate	★★★★	Daten können automatisch in STEP, VRML oder DWF konvertiert werden. Import und Export werden unterstützt. Änderungen am 3D-Modell werden auf das neutrale Format automatisch vererbt.
ECAD Unterstützung	★	Unterstützt das System die Entwicklung mechatronischer Systeme und damit einhergehend die Anbindung an Systeme zum Entwurf elektronischer Bauelemente, SPS oder Microcontrollern.
Zeichungsverwaltung, Redlining	★	Es können auch Zeichnungen verwaltet werden, die im Programm oder mit einem Betrachter geprüft werden können (redlining).
Projektmanagement		
Projektplanung	★	Zuweisung von Ressourcen, Meilensteine, neues Projekt starten
Monitoring/Reports	☆	Pareto-Charts, Auswertung Laufzeit der Entwicklung, Kostenauswertung usw.
Portfolio verwalten	☆	Welche Produkte werden angeboten
Projektverlauf dokumentieren	★★★★	Tatsächlicher Aufwand, Dokumentation des Projektverlaufs
Supply-Chain Integration	☆	Lieferanten verwalten, Make/Buy Entscheidungen treffen
ERP Anbindung	★★★	Der Austausch von Materialdaten, Dokumenten und Stücklisten mit einem ERP ist möglich. Eine konfigurierbare Schnittstelle bzw. Anbindung über einen ESB ist möglich.
Prozessmanagement		
Abbildung der Geschäftsprozessen/-workflows	★	Prozesse für Angebotsverwaltung, Kundenanfragen, Projektverwaltung können definiert werden.
Definition der Rollen und Rollenverteilung	★★★	Es ist eine Nutzerverwaltung vorhanden. Einem Nutzer können Rollen zugewiesen werden. Dieses Feature hängt eng mit dem Projektmanagement zusammen.
Workflows zum Ändern, Genehmigen oder Freigeben	★★★	Ein Change Management ist vorhanden und kann angepasst werden. Es können sowohl einzelne Dokumente als auch Mappen (ein Verbund von Dokumenten, Artikeln usw) freigegeben werden.
Verteilung auf bzw. Benachrichtigung von Nutzern	★★★	Als eine Aufgabe im Change Management können Nutzer von Änderungen in Kenntnis gesetzt werden.
Workflows zur Bewertung (Voting)	★★★	Man kann über ein bestimmtes Konzept Votings durchführen.
Webservices	★★★★★	Eine Service-Schnittstelle ist vorhanden, auf die z. B. mit einem Webservice von außen Informationen abgerufen oder gesendet werden können. Dadurch können weitere Softwarekomponenten integriert werden bzw. steuernd eingreifen. Der Austausch erfolgt über ein veränderbares, dokumentiertes Format, etwa ein XML-Formular. Die Formular-Daten können im PDM hinterlegt werden.
Datenhaltung		
Zugriff über WEB-Interface	★★★★★	Zugriff auf das System über einen Browser ist möglich.
GUI-Komponente	★	Es gibt eine extra GUI, Applikation zum Zugriff
Replikation der Daten	★★★	Die Datenbank kann kopiert und neu eingespielt werden
Portable Version	★★★	Man kann die Daten auch offline, etwa auf einem Laptop ohne Netzzugang benutzen

Chemnitzer Informatik-Berichte

In der Reihe der Chemnitzer Informatik-Berichte sind folgende Berichte erschienen:

- CSR-05-01** Daniel Beer, Steffen Höhne, Gudula Rünger, Michael Voigt, Software- und Kriterienkatalog zu RAfEG - Referenzarchitektur für E-Government, Januar 2005, Chemnitz
- CSR-05-02** David Brunner, Guido Brunnett, An Extended Concept of Voxel Neighborhoods for Correct Thinning in Mesh Segmentation, März 2005, Chemnitz
- CSR-05-03** Wolfgang Rehm (Ed.), Kommunikation in Clusterrechnern und Clusterverbundsystemen, Tagungsband zum 1. Workshop, Dezember 2005, Chemnitz
- CSR-05-04** Andreas Goerdts, Higher type recursive program schemes and the nested pushdown automaton, Dezember 2005, Chemnitz
- CSR-05-05** Amin Coja-Oghlan, Andreas Goerdts, André Lanka, Spectral Partitioning of Random Graphs with Given Expected Degrees, Dezember 2005, Chemnitz
- CSR-06-01** Wassil Dimitrow, Mathias Sporer, Wolfram Hardt, UML basierte Zeitmodellierung für eingebettete Echtzeitsysteme, Februar 2006, Chemnitz
- CSR-06-02** Mario Lorenz, Guido Brunnett, Optimized Visualization for Tiled Displays, März 2006, Chemnitz
- CSR-06-03** D. Beer, S. Höhne, R. Kunis, G. Rünger, M. Voigt, RAfEG - Eine Open Source basierte Architektur für die Abarbeitung von Verwaltungsprozessen im E-Government, April 2006, Chemnitz
- CSR-06-04** Michael Kämpf, Probleme der Tourenbildung, Mai 2006, Chemnitz
- CSR-06-06** Torsten Hoefler, Mirko Reinhardt, Torsten Mehlan, Frank Mietke, Wolfgang Rehm, Low Overhead Ethernet Communication for Open MPI on Linux Clusters, Juli 2006, Chemnitz
- CSR-06-07** Karsten Hilbert, Guido Brunnett, A Texture-Based Appearance Preserving Level of Detail Algorithm for Real-time Rendering of High Quality Images, August 2006, Chemnitz
- CSR-06-08** David Brunner, Guido Brunnett, Robin Strand, A High-Performance Parallel Thinning Approach Using a Non-Cubic Grid Structure, September 2006, Chemnitz
- CSR-06-09** El-Ashry, Peter Köchel, Sebastian Schüler, On Models and Solutions for the Allocation of Transportation Resources in Hub-and-Spoke Systems, September 2006, Chemnitz
- CSR-06-10** Raphael Kunis, Gudula Rünger, Michael Schwind, Dokumentenmanagement für Verwaltungsvorgänge im E-Government, Oktober 2006, Chemnitz
- CSR-06-11** Daniel Beer, Jörg Dümmler, Gudula Rünger, Transformation ereignisgesteuerter Prozeßketten in Workflowbeschreibungen im XPDL-Format, Oktober 2006, Chemnitz

Chemnitzer Informatik-Berichte

- CSR-07-01** David Brunner, Guido Brunnett, High Quality Force Field Approximation in Linear Time and its Application to Skeletonization, April 2007, Chemnitz
- CSR-07-02** Torsten Hoeffler, Torsten Mehlan, Wolfgang Rehm (Eds.), Kommunikation in Clusterrechnern und Clusterverbundsystemen, Tagungsband zum 2. Workshop, Februar 2007, Chemnitz
- CSR-07-03** Matthias Vodel, Mirko Caspar, Wolfram Hardt, Energy-Balanced Cooperative Routing Approach for Radio Standard Spanning Mobile Ad Hoc Networks, Oktober 2007, Chemnitz
- CSR-07-04** Matthias Vodel, Mirko Caspar, Wolfram Hardt, A Concept for Radio Standard Spanning Communication in Mobile Ad Hoc Networks, Oktober 2007, Chemnitz
- CSR-07-05** Raphael Kunis, Gudula Rünger, RAfEG: Referenz-Systemarchitektur und prototypische Umsetzung - Ausschnitt aus dem Abschlussbericht zum Projekt "Referenzarchitektur für E-Government" (RAfEG) -, Dezember 2007, Chemnitz
- CSR-08-01** Johannes Steinmüller, Holger Langner, Marc Ritter, Jens Zeidler (Hrsg.), 15 Jahre Künstliche Intelligenz an der TU Chemnitz, April 2008, Chemnitz
- CSR-08-02** Petr Kroha, José Emilio Labra Gayo, Using Semantic Web Technology in Requirements Specifications, November 2008, Chemnitz
- CSR-09-01** Amin Coja-Oghlan, Andreas Goerdts, André Lanka, Spectral Partitioning of Random Graphs with Given Expected Degrees - Detailed Version, Januar 2009, Chemnitz
- CSR-09-02** Enrico Kienel, Guido Brunnett, GPU-Accelerated Contour Extraction on Large Images Using Snakes, Februar 2009, Chemnitz
- CSR-09-03** Peter Kochel, Simulation Optimisation: Approaches, Examples, and Experiences, März 2009, Chemnitz
- CSR-09-04** Maximilian Eibl, Jens Kursten, Marc Ritter (Hrsg.), Workshop Audiovisuelle Medien: WAM 2009, Juni 2009, Chemnitz
- CSR-09-05** Christian Horr, Elisabeth Lindinger, Guido Brunnett, Considerations on Technical Sketch Generation from 3D Scanned Cultural Heritage, September 2009, Chemnitz
- CSR-09-06** Christian Horr, Elisabeth Lindinger, Guido Brunnett, New Paradigms for Automated Classification of Pottery, September 2009, Chemnitz
- CSR-10-01** Maximilian Eibl, Jens Kursten, Robert Knauf, Marc Ritter, Workshop Audiovisuelle Medien, Mai 2010, Chemnitz
- CSR-10-02** Thomas Reichel, Gudula Rünger, Daniel Steger, Haibin Xu, IT-Unterstützung zur energiesensitiven Produktentwicklung, Juli 2010, Chemnitz

Chemnitzer Informatik-Berichte

ISSN 0947-5125

Herausgeber: Fakultät für Informatik, TU Chemnitz
Straße der Nationen 62, D-09111 Chemnitz