Tagungsband

2.Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2004

am 23. und 24.September 2004
im Schloss Pillnitz bei Dresden

Herausgegeben von

Ralph Stelzer
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

Klaus Brökel
Universität Rostock
Institut für Konstruktionstechnik

Frank Engelmann
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion

Saxoprint
Dresden 2004

Vorwort

Mit dem 2. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik wird eine im Vorjahr in Kühlungsborn sehr erfolgreich eröffnete Veranstaltungsreihe fortgeführt.

Der Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD des Institutes für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der Technischen Universität Dresden, der Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der Fakultät für Maschinenwesen und Schifftechnik der Universität Rostock sowie der Lehrstuhl Konstruktionstechnik des Institutes für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg haben sich zum Ziel gestellt, einmal im Jahr führende Vertreter aus Forschung und Industrie zu Fragen der Konstruktionstechnik zusammenzuführen. Dabei steht der Aspekt im Vordergrund, neue Ideen und Lösungsansätze nicht nur vorzustellen, sondern auch gemeinsam ausführlich diskutieren zu können.

Das in diesem Jahr in Pillnitz bei Dresden durchgeführte Treffen widmet sich Methoden und Werkzeugen, die im Rahmen des Managements des Produktlebenszyklus Anwendung finden. Das "Product Lifecycle Management" (PLM) hat sich in den letzten Jahren aus dem System zur Verwaltung von Produktdaten entwickelt. PLM erweitert jedoch diesen Ansatz wesentlich, indem nicht mehr nur die klassische Sicht auf Informationen im Entwicklungsbereich im Mittelpunkt steht, sondern weit darüber hinaus alle Aspekte von der Konzeption eines Produktes, über Entwicklung, Fertigung und Vertrieb bis zur Nutzung betrachtet werden. Dadurch werden nicht nur die Produktmodelle wesentlich komplexer, sondern es müssen auch erweiterte Prozesse unterstützt werden (u.a. Requirement Traceability [RTM], Configuration Management [CM], Maintanance, Repair and Operation [MRO]) und die Informationsflüsse sind über Unternehmensgrenzen hinaus mit Zulieferern, Partnern und Kunden zu vernetzen.

Eine solche Zielstellung ist natürlich nicht nur ein informationstechnisches Anliegen, sondern erfordert auch teilweise völlig neue Sichten und Methoden der an der Produktentstehung beteiligten Fachdisziplinen. Das Kolloquium in Pillnitz widmet sich nun speziell den Anforderungen an die Konstruktionstechnik und den Antworten auf die speziellen Fragestellungen.

Meinen Dank möchte ich meinen Kollegen aus Rostock, Herrn Prof. Dr. Klaus Brökel, sowie aus Magdeburg, Herrn Dr. Frank Engelmann, für deren Unterstützung und die Durchsicht der Beiträge aussprechen.

Auch meinen Mitarbeitern am Lehrstuhl, speziell Herrn Dr. Bernd Platz sowie Frau Martina Behringer, danke ich für ihre Hilfe bei der Organisation des Kolloquiums.

Dresden, im August 2004

Ralph Stelzer

Berechnungsmodell „Sicherheit-Zuverlässigkeit-Instandhaltung" als Grundlage für das Product Lifecycle Management
Dietrich SCHLOTTMANN
Universität Rostock 1

Optimierung des Produktentstehungsprozesses ist ein Wettbewerbsvorteil
Ayhan KURTULDU
Keiper GmbH & Co. KG, Kaiserslautern 13

Systempartnerschaft und Plattformen – gewichtige Aspekte für PLM!
Heinz–Simon KEIL
Siemens AG,Bereich Corporate Technology – Production Processes 27

Dynamische Entwicklungsprozesse als Antwort auf veränderte Marktanforderungen
Heinz RYBAK
MDTVISION GmbH, München 39

Moderne Methoden der Forschung und Entwicklung in der Experimentellen Fabrik
Sven BROCKOP, Christiane BEYER, Frank ENGELMANN
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 49

Aspekte des Virtual Engineering im Schiffbau
Uwe VON LUKAS[1], Haygazun HAYKA[2], Guido SCHULTE[3]
[1]Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V., Rostock
[2]Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Berlin
[3]Aker Ostsee, Wismar 59

Szenarien zur Evaluation von AR- unterstützter Wartungstätigkeit
Ralph STELZER, Wolfgang STEGER, Bernhard SASKE
Technische Universität Dresden 67

Produktentwicklung mit Rapid Prototyping
Wolfram STOLP
Fachhochschule Südwestfalen, Abt. Meschede 75

Das unternehmensindividuelle Produktdatenmodell als Voraussetzung einer erfolgreichen PDMS-Einführung – ein Erfahrungsbericht
Jörg FELDHUSEN, Boris GEBHARDT, Erwin-Zahari NURCAHYA, Nils MACKE
RWTH Aachen 81

Methodische Ansätze für die Weiterverwendung der digitalen Produktmodelle in der Produktentwicklung
Michael ABRAMOVICI, Alexander STEKOLSHCHIK
Ruhr-Universität Bochum 91

Domänenübergreifende Spezifikation der Prinziplösung von selbstoptimierenden Systemen des Maschinenbaus
Jürgen GAUSEMEIER, Ursula FRANK, Andreas SCHMIDT, Henner VÖCKING
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn 101

Anwendung von künstlicher Intelligenz zur schnellen Knochenmodell-Erkennung und -Rekonstruktion - Eine Studie
Stanley BAKSI, Ramona SCHWARZ, Frank ENGELMANN
Otto von Guericke Universität Magdeburg 115

Virtuelle Visualisierung und Modellierung von Schädelknochen anhand von CT-Daten
Ralph STELZER, Andreas KOSSLER, Mathias FUNKE,
Uwe ECKELT, Matthias SCHNEIDER
Technische Universität Dresden 129

Entwicklung von Zellkultursystemen mit Hilfe von Rapid Prototyping Verfahren
Frank ENGELMANN, André HILLIGER
KEK GmbH, Bad Schmiedeberg 141

Maßgeschneiderte Implantatmaterialien für den Gewebeersatz auf der Basis von mineralisiertem Kollagen
Michael GELINSKY, Wolfgang POMPE
Technische Universität Dresden 151

Experimentelle und Virtuelle Produktentwicklung in der Medizin
Hendrik KLEIN, Klaus BRÖKEL
Universität Rostock 159

Experimentelle und virtuelle Produktentwicklung in der Zahnprothetik – Produktionstechnische Aspekte
Christine SCHÖNE, Steffen SCHREIBER
Technische Universität Dresden 167

Hauptzonen im Prozess der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien
Piotr GENDARZ
Schlesische Technische Universität Gliwice 177

Anforderungen an den Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik
Hansgeorg BINZ, Robert WATTY
Universität Stuttgart 187

Probleme der verteilten Konstruktion maschinenbaulicher Erzeugnisse - Ein Erfahrungsbericht aus der studentischen Ausbildung
Reinhard RAHN, Jana HADLER, Klaus BRÖKEL
Universität Rostock 195

Objektorientierte Produktmodellierung zur Unterstützung der Demontagegerechtigkeit
Peter SIGALOV
Universität Russe 205

Zuverlässigkeit und Lebenszykluskosten als konstruktive Entscheidungskriterien im Produktentwicklungsprozess
Henrik SCHNEGAS
Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design 215

FVK – ein besonderer Werkstoff im PLM
Jan BRÖKEL, Gerhard SCHARR
Universität Rostock 225

Autoren 233

Berechnungsmodell „Sicherheit-Zuverlässigkeit-Instandhaltung“ als Grundlage für das Product Lifecycle Management

Dietrich SCHLOTTMANN

Universität Rostock

1 Einleitung

Seit mehr als 100 Jahren gehört die Berechnung der Sicherheit gegen Überlastung zur Auslegungspraxis in der Konstruktion. Insbesondere für Versagen durch Ermüdung wurden die Berechnungsverfahren ständig weiterentwickelt. Eine neue Qualität konnte durch Betriebsfestigkeitslehre mit der Lebensdauerberechnung erreicht werden.

Durch Arbeiten des Verfassers (vgl. z.B. [1]) wurde die Lebensdauerberechnung auf Verschleiß und andere lastabhängige Schädigungsprozesse übertragen, wobei das Bemühen darin bestand, die Lebensdauer nicht nur für nominelle Zuverlässigkeit, sondern Zuverlässigkeiten für beliebige Zeitpunkte zu berechnen. Damit wurde es möglich, auch die Systemzuverlässigkeit einer Maschine für den gesamten Lebenszyklus von Frühausfällen bei der Erprobung bis zu Spätausfällen einschließlich der Instandhaltung einer Modellierung und Berechnung zugänglich zu machen.

Durch ein baukastenartig aufgebautes Berechnungssystem werden die bekannten „Sicherheiten in Beanspruchungen“ wie auch „lebensdauerbasierte Sicherheiten“ mit den Zusatzinformationen „Wöhlerexponent“ und „Streubreite“ in aktuelle Zuverlässigkeiten umgerechnet, womit der Anschluss an die Zuverlässigkeitstheorie gegeben ist.

Mit den in [2] entwickelten Kostenmodellen können strategische Entscheidungen z.B. bzgl. erhöhter Zuverlässigkeit bzw. erforderlicher Instandhaltungsmaßnahmen getroffen werden.

Im angebotenen Vortrag wird der Versuch unternommen, das bisher vordergründig auf die Auslegung gerichtete Anliegen des Buches bzgl. seiner Anwendbarkeit auf das PLM auszuloten.

2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie (vgl. 3.2 in [2])

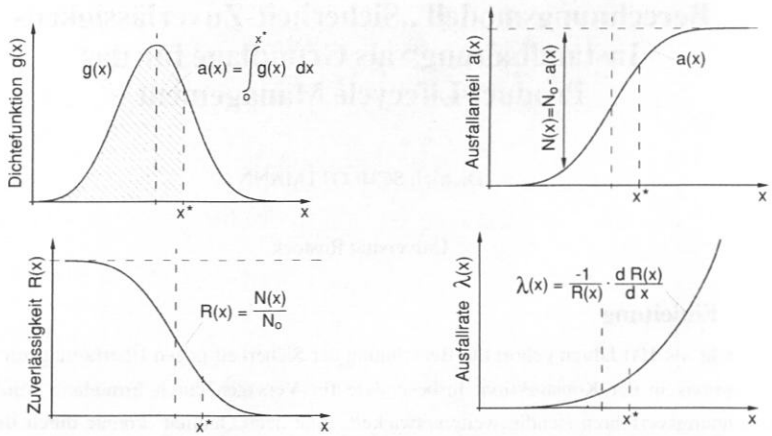


Abb. 3.3. Zusammenhang zwischen den Grundgrößen der Zuverlässigkeitstheorie

Die Zuverlässigkeitstheorie betrachtet das Versagen als Funktion der Zeit t oder daraus abgeleiteter Funktionen.

- die Dichtefunktion bzw. Ausfallhäufigkeit g(x)
- der Ausfallanteil a(x)
- der Bestandanteil N(x)
- die Zuverlässigkeitsfunktion R(x)
- die Ausfallwahrscheinlichkeit F(x)
- die Ausfallrate λ (x),

die in definiertem mathematischen Zusammenhang stehen (vgl. Abb. 3.3)

Die Zuverlässigkeitsfunktion ist im Intervall $0 \le R(x) \le 1$ definiert und kennzeichnet die Überlebenswahrscheinlichkeit. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit F(x) gilt damit

$$F(x) = 1 - R(x) \qquad (1)$$

Eine häufig benutzte Kenngröße ist die Ausfallrate $\lambda(x)$, die die Dichtefunktion g(x) auf den Bestandanteil N(x) bezieht.

Eine Analyse von Bauteilen bzgl. ihrer Ausfallrate über die gesamte Nutzungsdauer ergibt i.d.R. einen typischen und für alle technischen Gebilde zumindest qualitativ wiederkehrenden Verlauf (vgl. Abb. 3.4), der wegen gewisser Ähnlichkeit als „Badewannenkurve" bezeichnet wird.

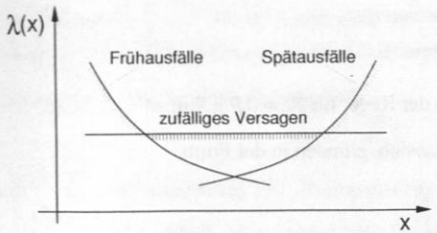


Abb. 3.4. „Badewannenkurve" für das Ausfallverhalten technischer Gebilde

Nach zunächst häufigen Frühausfällen, die i.d.R. auf Fertigungsfehlern beruhen, klingt das Ausfallverhalten ab und geht über in den Bereich des zufälligen Versagens das meistens auf äußere Einwirkungen infolge „zufälliger" Ereignisse zurückzuführen ist. Für das Anliegen des Buches, Lebensdauer und Zuverlässigkeit infolge Ermüdung, Verschleiß und anderer flächen abtragender Prozesse zu beschreiben und zu berechnen, gebührt den Spätausfällen besondere Beachtung. Sie sind Grundlage der Auslegung und Dimensionierung in der Konstruktionsphase.

3 Schädigung und Versagen technischer Gebilde (vgl. 3.3 in [2])

Technische Gebilde sind während ihrer Nutzung ständig einer Schädigung unterworfen. Erreicht die Schädigung Grenzen, die eine Funktionserfüllung nicht mehr gewährleisten, so wird die Schädigung als Versagen bezeichnet. Sie ist den Spätausfällen zuzuordnen.

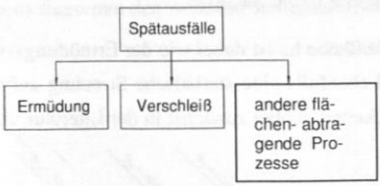


Abb. 3.1. Systematik der Spätausfälle

Folgen wir der von Wöhler ein geführten und später auch für Wälzlager verwendeten Methodik, jeder Schädigungsbelastung B_{Sch} die erreichbare Lebensdauer zuzuordnen, so ergibt sich eine Grenzkurve

$$B_{Sch} = f(L) \tag{2}$$

die für alle Schädigungsarten hyperbellartig abfallende Verläufe annimmt.

Am häufigsten wird der Ansatz

$$B = C \cdot \frac{1}{L} \tag{3}$$

oder mit einem weiteren Freiwert in der Form

$$B^a \cdot L = C \tag{4}$$

verwendet, wobei sie für eine Linie R_z const in der Regel für $R_n = 0{,}9$ gültig ist.

Für Wälzlager wird die Gleichung (4) aus Dimensionsgründen in der Form

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{B} \right)^a \tag{5}$$

verwendet. Für Ermüdung kommt das Phänomen der Langlebigkeit bzw. Dauerfestigkeit hinzu (vgl.Abb. 3.12).

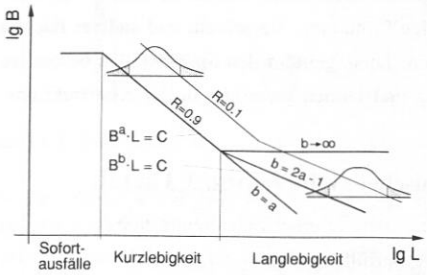


Abb. 3.12. Wöhlerdiagramm mit Streufeld

Auch der Verschleiß lässt sich mit dieser Methodik beschreiben.

Das Verschleißvolumen V_V bzw. die Verschleißhöhe h_V ist dabei wie der Ermüdungsvorgang von einer Beanspruchung abhängig und wird ebenfalls eine statistische Streuung aufweisen. Die Abb. 3.26 verdeutlicht diese Gesetzmäßigkeiten, wobei zunächst in der Literatur üblichen Auftragungen gefolgt wird.

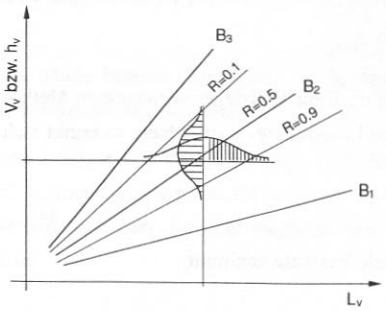


Abb. 3.16. Einfluss der Belastung auf den Verschleißvorgang ($B_1<B_2<B_3$), statistische Verteilung für V_V bzw. h_V = const.

Die Gültigkeit der Gl. (4) lässt sich auch aus bekannten Verschleißansätzen ableiten, wobei sowohl die Verschleißbeanspruchung B_V als auch die Lebensdauer L_V neu zu definieren sind.

Es ist üblich, eine Verschleißintensität I_h

$$I_h = \frac{h_V}{s_R} \tag{6}$$

mit s_R ... Verschleißweg bzw. Reibungsweg

h_V ... Verschleiß- oder Abtragshöhe (linear)

einzuführen.

Von Kragelski wird der Zusammenhang

$$I_h = C \cdot \bar{\tau}_R^m \tag{7}$$

mit $\bar{\tau}_R$ ... mittlere Reibschubspannung nachgewiesen.

Durch Gleichsetzen von (6) und (7) ergibt sich

$$\frac{h_V}{s_R} = C \cdot \bar{\tau}_R^m \tag{8}$$

oder

$$\bar{\tau}_R^m \cdot s_R = h_V(s_R) \cdot C \tag{9}$$

Durch den Vergleich mit Gl. (4) wird die Verschleißbeanspruchung mit $B_V = \bar{\tau}_R$ und die Lebensdauer mit $L_V = s_R$ definiert. Deuten wir h_V als eine zum Schaden führende Verschleißhöhe, so ergibt sich eine wöhlerlinienähnliche Auftragung mit Streufeld, die wir als zweckmäßiges Arbeitsdiagramm den weiteren Betrachtungen zu Grunde legen wollen (vgl. Abb. 3.29).

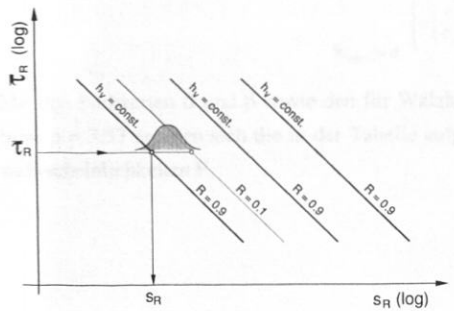


Abb. 3.29. Wöhlerkurvenähnliche Auftragung für den Verschleiß

Die für Wälzlager, Ermüdung und Verschleiß angewendete Methodik wurde vom Verfasser auch auf Korrosion, Erosion, Kettenschädigung u. a. angewendet. Die Tafel 1 zeigt eine Auswahl Wöhlerexponenten und Streubreiten T.

	a	b	T_x	T_B
Ermüdung				
ungekerbte Stäbe	12 ... 15		5 ... 8	
gekerbte Bauteile				
· Spitzkerben	3 ... 4	∞	1,2 ... 1,4	
· Normalkerben	5 ... 7	bzw.	3 ... 5	
· Flachkerben	6 ... 8	2a-1	6 ... 8	
· Zahnfuß (Evolvente)	6 ... 12*		4 ... 8	
· Schweißverbindungen	4 ... 8		15 ... 25	
Kontakt				$T_B = \sqrt[a]{T_x}$
· Kugellager	3,0	b = a	10	
· Rollenlager	3,3		10	
· Zahnflanke	3... 8*		8 ... 10	
· Ventilsitz	3... 5		7 ... 15	
Verschleiß				
· Brems- und Kupplungsbeläge	1...2,5		3 ... 8	

* obere Werte aus Laufversuchen

Tabelle 1: Typische Streufelder und Exponenten für Wöhler-Diagramme (Maschinenbau)

4 Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit bzw. Schadenswahrscheinlichkeit und Sicherheit (vgl. 5.3 in /2/)

Wälzlagern sind bekanntlich für eine nominelle Lebensdauer L_n mit einer Zuverlässigkeit R = 0.9 (10% vorzeitiger Ausfall) auszulegen. Das bringt eine „Lebensdauerreserve" oder für eine vorgegebene Lebensdauer $L < L_n$ eine erhöhte Zuverlässigkeit $R > 0.9$ mit sich. Diese Modellvorstellung wird in Abb. 5.3 verdeutlicht.

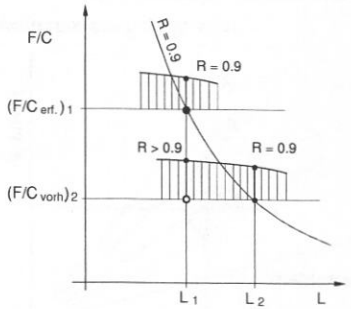


Abb. 5.3. Modellvorstellung für die relative Entlastung und Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Vergrößerung der Tragzahl

Zur Lösung dieser Aufgabe ist die Kenntnis der Verteilungsfunktion erforderlich. Für Wälzlager gilt mit guter Näherung die Weibull-Verteilung

$$R(x) = e^{-(\alpha \cdot x)^{\beta}}.$$

Mit $x = L/L_n$ und $L_m \approx 5 \cdot L_n$ lassen sich die Freiwerte zu $\alpha = 0.145$ und $\beta = 1.18$ bestimmen (vgl. Tafel IX.2.1 des Anhanges A)in /2/.

Gehen wir von der Lebensdauergleichung (3.63) aus und folgen der Modellvorstellung nach Abb. 5.3, kann die Vergrößerung der Tragzahl als relative Entlastung des Lagers gedeutet werden, wodurch sich die Lebensdauer von L_1 auf L_2 vergrößert.

Da sich der Vorgang entlang der Linie R = 0.9 vollzieht, vergrößert sich die nominelle Lebensdauer von L_{n1} auf L_{n2}. Für gleiche Belastung $F_1 = F_2$ folgt mit der Lebensdauergleichung

$$L_{n1} = L_{n2} \left(\frac{C_{vorh.}}{C_{erf.}} \right)^{p} \tag{10}$$

d.h. die bezogene Zeit der Weibull-Verteilung verringert sich von

$$x_1 = \frac{L_1}{L_{n1}} = 1 \quad \text{auf} \quad x_2 = \frac{L_1}{L_{n2}} \tag{11}$$

Damit ergibt sich

$$x_1 = \frac{L_1}{L_{n1}} \left(\frac{C_{erf.}}{C_{vorh.}} \right)^{p} = \left(\frac{C_{erf.}}{C_{vorh.}} \right)^{p} \tag{12}$$

Die Zuverlässigkeit erhöht sich also von R =0.9 für $C_{vorh.} = C_{erf.}$ auf die „aktuelle Zuverlässigkeit"

$$R_{akt.} = e^{-\left(\alpha \left(\frac{C_{erf.}}{C_{vorh.}} \right)^{p} \right)^{\beta}} \tag{13}$$

Mit den Freiwerten α und β sowie den für Wälzlager bekannten Wälzlagerexponenten p = 3 bzw. p = 3.33 ergeben sich die in der Tabelle aufgelisteten Zuverlässigkeiten R und Ausfallwahrscheinlichkeiten F.

$C_{vorh.}/C_{erf.}$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
$R_{p=3.00}$	0.900	0.947	0.969	0.981	0.987	0.991	0.994
$R_{p=3.33}$	0.900	0.951	0.973	0.984	0.990	0.993	0.995
R	0.90	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
F	10%	5%	3%	2%	1%	0.8%	0.6%

Tabelle 2. Aktuelle Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit durch Tragzahl-Reserve

Aus der Tabelle wird erkennbar, dass für p = 3 und p = 3.33 keine nennenswerten Unterschiede auftreten, so dass hinreichend genau mit R und F als Mittelwert gerechnet werden kann.

In der Tabelle wird weiterhin deutlich, dass eine Erhöhung der Tragzahl über das 2fache hinaus nur noch sehr geringe Verbesserungen der Zuverlässigkeit liefert. Damit wird es möglich, die durch die „Konstruktive Reserve" erzielte Zuverlässigkeitserhöhung auch für das System zu rechnen. Es wird auf das Beispiel 8 im Anhang B verwiesen.

Die Erhöhung der Tragzahl von $C_{erf.}$ auf $C_{vorh.}$ kann auch als relative Entlastung gedeutet werden. Ebenso ist natürlich auch eine zusätzliche Lastabsenkung der Auslegungsbelastung $F_{ausl.}$ auf $F_{vorh.}$ möglich.

Ohne neue Ableitung folgt dann

$$R_{akt.} = e^{-\left(\alpha\left(\frac{C_{erf.}}{C_{vorh.}}\right)^{p}\cdot\left(\frac{F_{vorh.}}{F_{ausl.}}\right)^{p}\right)^{\beta}} \tag{14}$$

Diese Lastabsenkung kann auch als Sicherheit S_B gedeutet werden.

Mit $C_{erf}=C_{vorh}$ kann auch geschrieben werden

$$R_{akt.} = e^{-\left(\alpha\cdot\left(\frac{1}{S_B}\right)^{p}\right)^{\beta}}, \tag{15}$$

oder mit der Lebensdauersicherheit $S_L=S_B{}^p$

$$R_{akt.} = e^{-\left(\alpha\cdot\left(\frac{1}{S_L}\right)\right)^{\beta}} \tag{16}$$

Diese am Beispiel des Wälzlagers aufgestellten Überlegungen lassen sich direkt auf den Kurz- bzw. Zeitfestigkeitsbereich (vgl. Bild 5.4) sowie auf Verschleiß und last- und andere zeitabhängige Schädigungen übertragen.

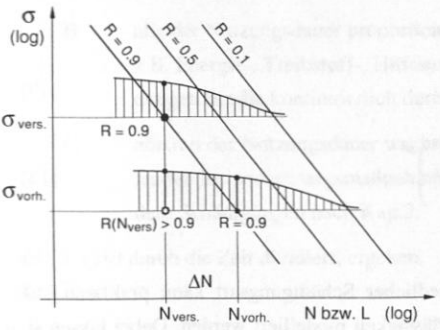


Abb. 5.2. Zusammenhang zwischen Lebensdauerreserve ΔN und Zuverlässigkeit $R(N_{vers.})$

Während sich für das Wälzlager die Bestimmung der Freiwerte α und β wegen $L_m = 5 \cdot L_n$ nur einmal zu erfolgen hatte, müssen diese immer wieder aus der L_m und T_L neu bestimmt werden. Tabelle 3 bzw. Tabelle 5.2 in [2]

T_L	1	2	3	5	7	9	15	20	30
x_m	1	1.5	2	3	4	5	8	~10	~15
α	1.0	0.606	0.444	0.270	0.189	0.142	0.087	0.0617	0.0384
β	∞	4.60	2.75	1.75	1.39	1.16	0.92	0.83	0.71

Tabelle 3: Freiwerte α und β der Weibull-Verteilung für $R(x_n=1) = 0.9$ und $R(x_m) = 0.5$ als Funktion der Streubreite T_L

5 Übergang vom Auslegungsmodell zum PL-Modell

Während beim Auslegungsmodell die aktuelle Zuverlässigkeit bewusst als Funktion der Sicherheiten S_B bzw. S_L dargestellt wurde, ist für das PL-Modell natürlich die Abhängigkeit von der Echtzeit gefragt.

Mit $$S_L = \frac{L_{vorh}}{L_{vers}} \tag{17}$$

folgt aus Gl. (15) $$R_{akt} = e^{-\left(\frac{\alpha \cdot L_{vers}}{L_{vorh}}\right)^{\beta}} \tag{18}$$

hiermit kann L_{vorh} als Echtzeit variiert werden

Bei „mehrfacher" Schädigung und unterschiedlicher Schädigungsart kann praktisch jedes technische Gebilde mit Hilfe der Systemzuverlässigkeit modelliert werden. Dabei lassen sich auch instandhaltungsbedingte „Erneuerungen" berücksichtigen (s. Abb. 7.16)

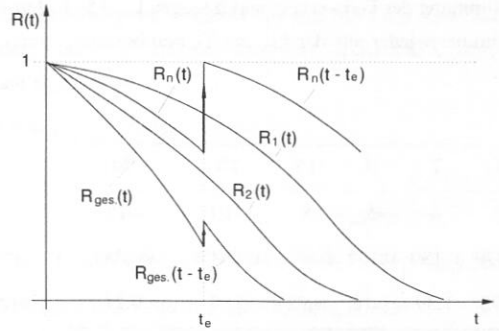


Abb. 5.3. Element- und Systemzuverlässigkeit bei Erneuerung des n-ten Elementes zum Zeitpunkt t_e

Hierzu wird der Übergang auf die so genannte „dreiparametrige" Weibullverteilung mit ausfallfreier Zeit t_0 erforderlich.

6 Lebenslaufkostenmodell und Bestimmung der optimalen Nutzungsdauer eines technischen Gebildes (vgl.7.2.2. in [2])

Ein einfaches Modell zur Beschreibung der Lebenslaufkosten aus der Sicht des Anwenders finden wir z.B. bei Eichler. Es gilt die Gesamtkostengleichung

$$K = A + B \cdot t + C \cdot t^n . \tag{19}$$

Dabei können die Kostenanteile A, B, C wie folgt beschrieben werden:

A alle Kosten von der Herstellung bis zum Bruttoeinkaufspreis, sowie alle Beschaffungskosten für Aufstellung, Inbetriebnahme, Qualifizierung und Umschulung des Bedienpersonals

B alle der Nutzungsdauer proportionalen Aufwendungen für den Betrieb, wie z.B. Energie-, Treibstoff-, Hilfsstoff- und Bedienkosten, sowie alle Aufwendungen für die kontinuierlich durchzuführenden Pflege- und Wartungsarbeiten

C alle mit der Nutzungsdauer wachsenden Aufwendungen für die wiederherstellenden Instandsetzungsmaßnahmen infolge Ermüdungs-, Verschleiß- und andere Schädigungen nach Kap.2.

Wird Gl. (19) durch die Zeit dividiert, ergeben sich die zeitlich anfallenden Kosten K/t bzw. K^* zu

$$K^* = \frac{K}{t} = \frac{A}{t} + B + C \cdot f(t) \qquad (20)$$

In Abb. 7.6 wird ein ausgeprägtes Kostenminimum erkennbar, das ein Maß für die minimalen Aufwendungen je Zeiteinheit ist und zum Zeitpunkt der ökonomisch optimalen Nutzungsdauer führt

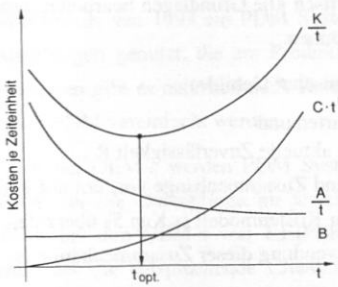


Abb. 7.6. Bestimmung der ökonomisch optimalen Nutzungsdauer für progressiven Instandhaltungsaufwand (nach /25/ in /2/)

Es liegt nahe, f(t) mit der Ausfallwahrscheinlichkeit F(t)zu identifizieren.

Es gilt damit $K^* = \frac{A}{t^*} + B + C \cdot \left(1 - R\left(t^*\right)\right)$ (21)

und mit der Weibull-Verteilung nach Gl. (3.23) $K^* = \frac{A}{t^*} + B + C \cdot \left(1 - e^{-(\alpha \cdot t)^{\beta}}\right)$ (22)

Ohne den Kostenanteil B, der auf das Optimum ohne hin keinen Einfluss hat, wurde die Gleichung für $\beta = 2$ ausgewertet (s .Bild 7.7)

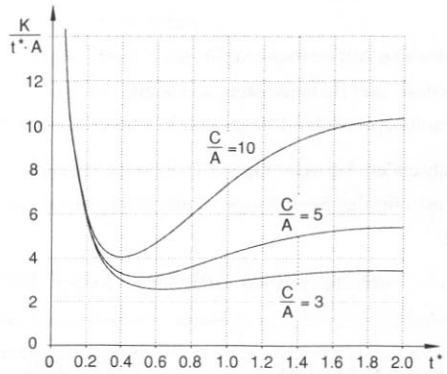


Abb. 7.7. Dimensionslose Kostenkennzahl für Weibull-Exponent ß=2

Es sei außerdem auf das Beispiel 10 im Anhang von [2] verwiesen.

7 Zusammenfassung

Ohne den Begriff PLM zu benutzen, werden in [2] praktisch alle Grundlagen bearbeitet, um für PLM ein konkretes Berechnungsmodell ableiten zu können.

Mit dem Ziel des Buches [1] und [2], die Auslegung technischer Gebilde

- durch Einbeziehung weiterer Schädigungsarten und
- die Qualifizierung der Sicherheit durch die aktuelle Zuverlässigkeit R_{akt}

zu verbessern, liegen im Auslegungsprozess alle Daten und Zusammenhänge vor, um auf ein Echtzeit – Zuverlässigkeitsmodell (s. Kap. 4) und auf ein Kostenmodell (s.Kap.5) überzuleiten. Es bleibt zu hoffen, dass auch in der Praxis eine Anwendung dieser Zusammenhänge erfolgen wird.

Literatur

[1] Schlottmann, D. Auslegung von Konstruktionselementen Springer-Verlag 1995

[2] Schlottmann, D.; Schnegas, H., erweiterte Nachauflage 2002 und darin verwendete Quellen

Optimierung des Produktentstehungsprozesses ist ein Wettbewerbsvorteil

Ayhan KURTULDU

Keiper GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

Innovation ist bereits seit 90 Jahren mit dem Namen der Firma KEIPER verbunden. Gerade in der Sitzentwicklung und bei der Entwicklung und Produktion von Sitzkomponenten hat man es geschafft Standards zu setzen. Mit einem standardisierten Sitzlehnenversteller versorgt man z.B. ca. 60% des europäischen Marktes.

Entsprechend der Unternehmensstrategie ist auch der Einsatz von modernen Technologien Strategie. Gerade im Bereich Entwicklung werden weltweit von ca. 350 Konstrukteuren mit Hilfe ca. 250 CAD-Anlagen tagtäglich eine Vielzahl digitaler Konstruktionsdokumente erzeugt.

Nicht nur um diese Datenflut in den Griff zu bekommen, sondern auch um eine Zusammenarbeit der weltweit verteilten Engineering Abteilungen bei Keiper zu ermöglichen, wird bereits seit 1993 ein PDM System eingesetzt. Mittlerweile wird das System von allen Abteilungen genutzt, die am Produktentstehungsprozess beteiligt sind. Neben den internen Prozessen gibt es natürlich auch Zusammenarbeit mit Zulieferern und Kunden, die ebenfalls durch PDM vereinfacht werden.

Auch bei OEM´s werden PDM Systeme eingesetzt. Leider ist es gängige Praxis, dass die Zulieferer die Datenpflege im jeweiligen PDM System des OEM´s übernehmen müssen, allein bei den OEM´s von KEIPER sind das sechs verschiedene Systeme. Hierzu muss entweder die entsprechende Client Software für den Zugriff auf das Kundensystem beim Lieferanten installiert werden, oder der Zulieferer setzt einen „Resistent Engineer" direkt beim Kunden vor Ort ein.

Wenn in dem Bereich nicht gegengesteuert wird, sieht sich der Zulieferer mit verschiedenen PDM - Systeme konfrontiert die er nicht mehr händeln kann. Auf Dauer wird es nur funktionieren, wenn der Zulieferer mit seinem eigenen PDM System für jeden Kunden einen eigenen Prozess aufbaut. Das ist der Grund, dass sich KEIPER stark in Projekten engagiert, wo Standards für den CAD- und PDM- Datenaustausch geschaffen werden.

Das Resultat eines Forschungsprojektes war z.B., dass KEIPER heute mit dem Kunden DaimlerChrysler PDM - Daten austauscht, wo vorher ein Resident - Engineer die Daten manuell einpflegt hat. Die komplette Stelle wird heute nicht mehr benötigt. Auch der KEIPER Konstrukteur muss sich heute nicht mehr um das PDM - System des Kunden kümmern. Er wählt einfach den Kunden DaimlerChryser aus und definiert welche Daten verschickt werden sollen. Alles andere wird automatisch vom System erledigt.

Wenn alle sich alle auf ihre Prozesse konzentrieren und bereit sind über die Systemgrenzen hinaus zusammenzuarbeiten, dann gibt es heute über die existierenden Standards genug Möglichkeiten sowohl Entwicklungszeit wie auch Entwicklungskosten einzusparen.

Die Zulieferer haben ihre eigenen Prozesse und optimieren diese ständig. Nur so können sie Anforderungen der OEM´s wie Kosten und Qualität sowie Innovationsgeschwindigkeit erfüllen. KEIPER versteht sich nicht als verlängerte Werkbank der OEM´s, sondern als Partner der weltweiten Automobilbauer.

KEIPER

Inhalt

- Unser Umfeld ?
- Unsere Produkte ?
- Unsere Kunden ?
- Unsere Prozesse ?
- Unsere IT Strategie ?
- Unsere Einschätzung OEM ⟷ Zulieferer ?
- Unsere Aktivitäten ?
- Unsere Überzeugung ?

Unser Umfeld

KEIPER

Struktur Unternehmensgruppe

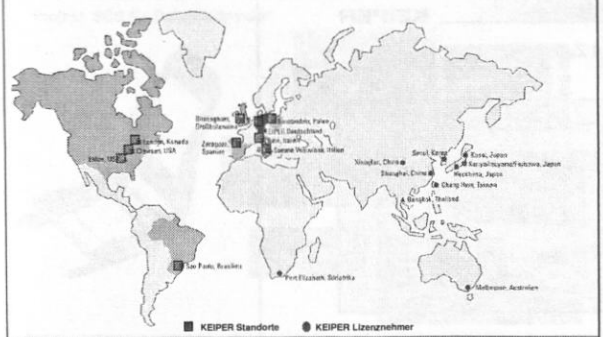
- Seit 1997 arbeiten wir als eigenständige Gesellschaften:
  - RECARO GmbH & Co. KG, Kirchheim/Teck
  - RECARO Aircraft Seating GmbH & Co. KG, Schwäbisch Hall
  - KEIPER GmbH & Co. KG, Kaiserslautern
- Die PUTSCH Holding übernimmt zentrale Steuerungsfunktionen in unserem Familienunternehmen.

PUTSCH HOLDING

RECARO | RECARO | KEIPER

Unser Umfeld

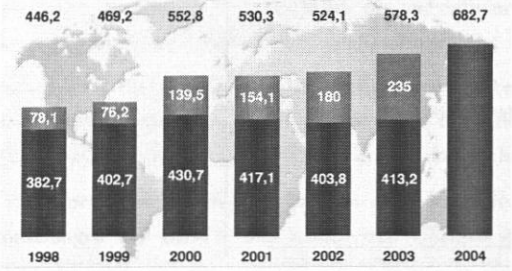
KEIPER



Unser Umfeld

KEIPER

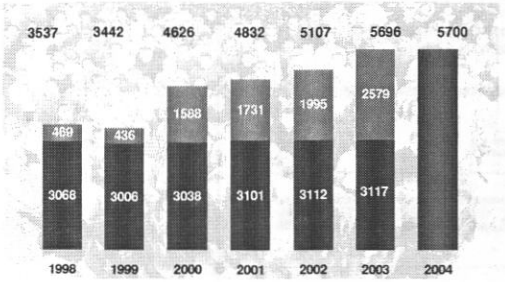
Umsatz (in Mio. Euro)



Unser Umfeld

KEIPER

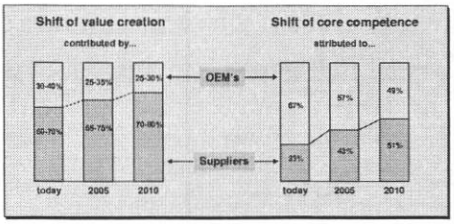
Mitarbeiter



Unser Umfeld

KEIPER

Verlagerung von OEMs auf Zulieferer



Source: Roland Berger

Unsere Produkte

KEIPER

Rastlehneneinsteller L2000

Rücksitzrastbeschlag Fold 2000

Bodenverriegelungsmodul Lock 2000

Lehne

Lehneneinsteller Taumel 2000 man. u. elektr.

Sitzhöheneinsteller manuell

Sitzeinsteller Vordersitz mit Track 2000

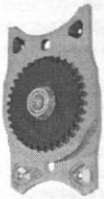
Sitzeinsteller Rücksitz mit Sidetrack 2000

Sitzhöheneinsteller 6-Wege Memory el.

Unsere Produkte

KEIPER

Lehneneinsteller T2000



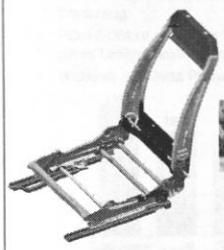
- Seit 1993 auf dem Markt, bis November 2000 einhundertmillionen Exemplare produziert.
- Tagesproduktion, 180.000 Einheiten.
- Über zehn Millionen Fahrzeuge pro Jahr.
- Jedes zweite Neufahrzeug in Europa.
- Kunden in 20 Nationen.

DaimlerChrysler, Valmet, Ford, Volvo, Jaguar, Honda, Fiat, Daewoo, Hyundai, Kia, Toyota, Vauxhall, Audi, Seat

Unsere Produkte

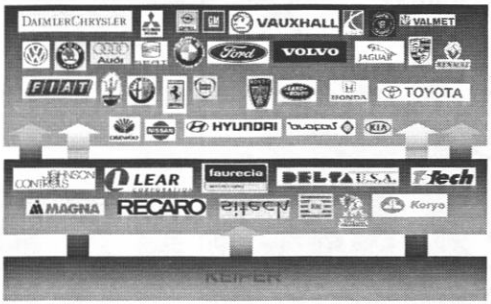
KEIPER

Projekt SCS für DaimlerChrysler



Unsere Kunden

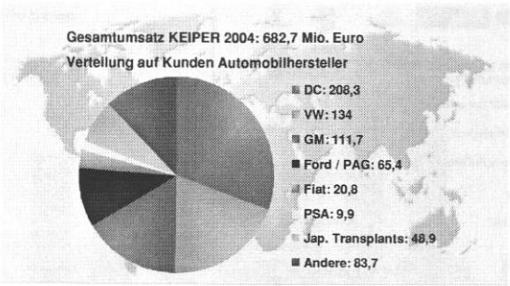
KEIPER



Unsere Kunden

KEIPER

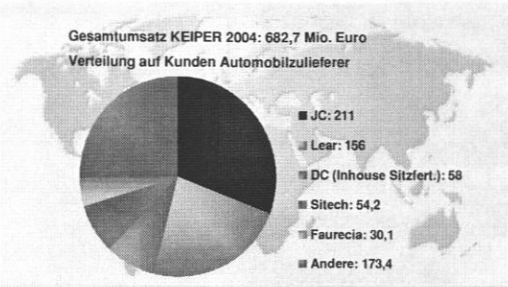
Umsatzanteile OEM



Unsere Kunden

KEIPER

Umsatzanteile First Tier



Unsere Prozesse

KEIPER

Increased collaboration

Collaboration types

- Synchronous / asynchronous
- Remote ↔ face to face
- Stable ↔ ad-hoc

Dimensions of collaboration

- **Cross-functional** (e. g. design-manufacturing, marketing-service)
- **Transdisciplinary** (e. g. mechanics-elektronics-software)
- **Cross-locational** (between different distributed locations within an enterprise)
- **Within the extended enterprise** (with partners, suppliers, customers, service providers)
- **With universities and research institutions**

Source: Uni-Bochum

Unsere Strategie

KEIPER

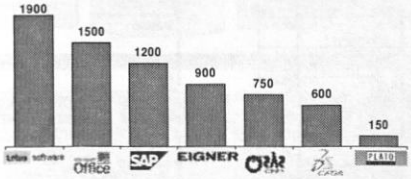
CAD - PDM/EDM Historie

- Bis 1991/1992 PROREN CAD - 2D.
- Ende 1991 die ersten CATIA 3D Arbeitsplätze.
- Zur Zeit 220 CATIA 3D Arbeitsplätze weltweit.
- Entscheidung für CADIM/EDB, für die CAD-Datenorganisation 1992/1993.
- Produktiver Einsatz von CADIM/EDM in der technischen Datenverarbeitung für den Datenaustausch 1993.
- Vision 1995
  - „Für alle Beteiligten am Produktentstehungsprozess alle Informationen in einem Informationssystem sichtbar werden lassen"
  - „Dokumente werden nicht mehr verteilt, sondern geholt"
- Einführung in der Entwicklung Oktober 1996.
- Einführung SAP bis 1996.
- Kopplung von CADIM/EDB und SAP 1.1.2000.

Unsere Strategie

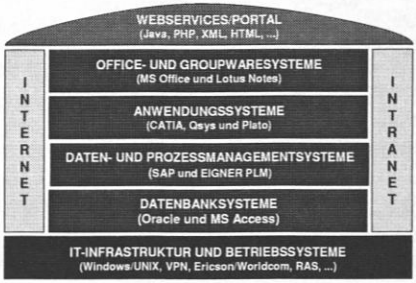
KEIPER

- PLM „Produkt Lifecycle Management" ist eine Strategie und kein Werkzeug.
- PDM/EDM ist eines der Werkzeuge um die PLM-Strategie innerhalb eines Unternehmens umzusetzen.
- Weltweit definierte Prozesse und Systeme.



Unsere Strategie

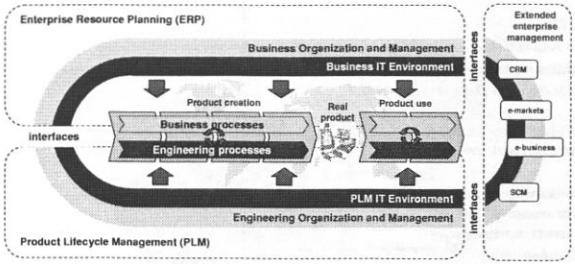
KEIPER



Unsere Prozesse

KEIPER

Future enterprise IT architectures



CRM: Customer Relationship Management SCM: Supply Chain Management Source: Uni-Bochum

Unsere Einschätzung OEM ⟺ Zulieferer

KEIPER

OEM	Einsatzgebiet	CAx	PDM	ERP
AUDI	car body	CATIA	PDVS/KVS	SAP
	power train	PRO/Engineer		
BMW	car body	CATIA	Prisma	
	power train	PRO/Engineer		
Ford	car body	I-DEAS	Metaphase	SAP
	power train	I-DEAS		
GM/Opel	car body	Unigraphics	iMan	SAP
	power train	Unigraphics		
DaimlerChrysler	car body	CATIA	GiS	SAP
	power train	CATIA	/ Smaragd	
Porsche	car body	CATIA	Matrix One	SAP
	power train	CATIA		
Volkswagen	car body	CATIA	KVS	SAP
	power train	PRO/Engineer		
Renault	car body	CATIA	?	?
	power train	CATIA		
Peugeot / Citroen	car body	CATIA	?	?
	power train	CATIA		
Fiat	car body	UGI	iMan	SAP
	power train	UGI		

Unsere Einschätzung OEM ⇔ Zulieferer

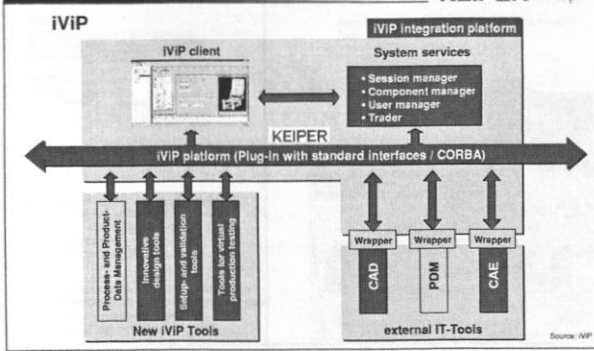
KEIPER

Unsere Sicht

- Einzelteil - Geometrie Datenaustausch ist kein Problem (CATIA-Native).
- Zusammenbau (assembly) Datenaustausch nur über „merge" oder „ovl" funktionenen. Bedeutet oft > 50 MB Dateien austauschen.
- Keinerlei Informationen über den Zusammenbau.
- Einzelteile werden für jeden Zusammenbau nochmal kopiert.
- Der Zulieferer arbeitet in wenigsten Fällen nur für einen OEM.
- Der Zulieferer hat seine eigenen Prozesse.
- Zulieferer (wie KEIPER) sind keine verlängerten Werkbänke der OEMs.
- Struktur Datenaustausch ist auch bei gleichen PDM-Systemen nicht möglich, im unterschied zu CAD.
- Man kann nicht alle PDM-Systeme der OEMs ins Haus holen.
- Es existieren definierte Standards: STEP AP214 CC6
- Die Standards werden seit 2 Jahren erfolgreich und produktiv in Projekten eingesetzt.

Unsere Aktivitäten

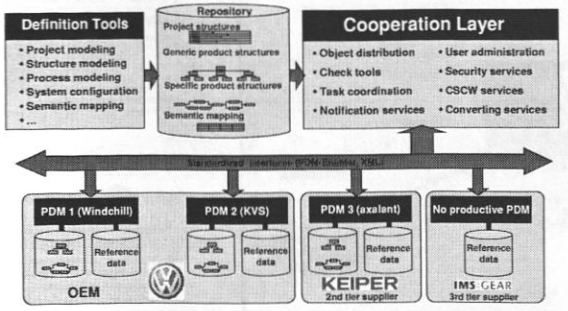
KEIPER



Unsere Aktivitäten

KEIPER

PDM-Collaborator



Unsere Aktivitäten

KEIPER

PDTnet Project DaimlerChrysler - Keiper - Behr

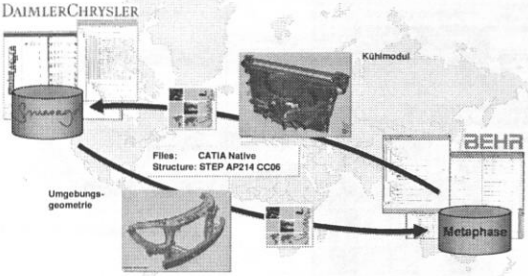
Seite 29 **Keiper IT** PTK Berlin 29.09.2004 Ayhan Kurtuldu

Unsere Aktivitäten

KEIPER

BEHR ⇔ DaimlerChrysler

DAIMLERCHRYSLER



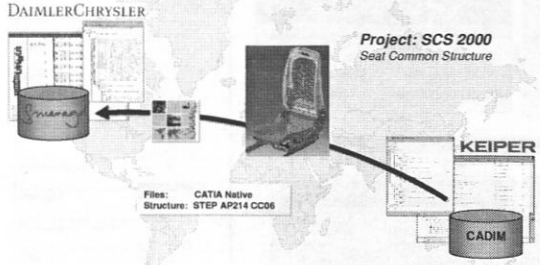
Seite 30 **Keiper IT** PTK Berlin 29.09.2004 Ayhan Kurtuldu

Unsere Aktivitäten

KEIPER

KEIPER ⇔ DaimlerChrysler

DAIMLERCHRYSLER

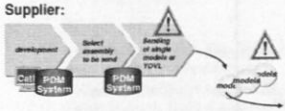


Seite 31 **Keiper IT** PTK Berlin 29.09.2004 Ayhan Kurtuldu

Unsere Aktivitäten

KEIPER

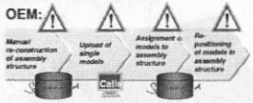
Supplier:



- **Assembly information only in Catia OVL, not in PDM System**
- **Defining data exchange by drag and drop**
  (28 different seat versions with 150 catia models each = 4200 models)
  Total time: 6 h
- **Catia models have to be imported into DC catia maps, modified and manual positioned**
  (Handling by a Resident Engineer)
  Total time: 80 h
- **Rework and correction loops are needed, models have to be transferred again**
  Total time: 10 h

Process without STEP (Assembly data transfer from Keiper to DC):

OEM:



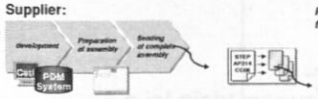
Problems:

1. **Missing models**
2. **Multiple used models multiple transferred**
3. **Missing attachments**
4. **Wrong positioned models transferred by fax or fon**

Unsere Aktivitäten

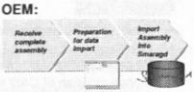
KEIPER

Supplier:



Process using STEP (Assembly data transfer from Keiper to DC):

OEM:



- **Administration of assembly information by PDM system using STEP**
- **Defining data exchange for all seat versions by drag and drop, only 28 (top assembly) models have to be assigned**
  Total time: 0.5 h
- **Automatically importing of all models into DC system, shrinking data hierachy and manual inspection**
  Total time: 1 h

Advantages:

1. **Reduced time from 96 h to 1.5 h per project milestone (≈ 6400% !). At Keiper we have about 16 milestones with our customers per year, that means 1512 h less per year (≈ 114912 € with 76 € per hour).**
2. **Reduced total process time for final releases (after end of design) = 14 days**
3. **Reduced transfer data (volume).**
4. **Automation of meta data exchange**
5. **Reliability**

Unsere Aktivitäten

KEIPER CATIA V5

Standardization of IT system documentation

- New concept for the support of documentation processes in IT projects
- Easy modular templates / MS Office standards (Usable for E-Learning)
- Workflow support by using Content Management functions (WebGate)

Project Controlling Prototype

- Easy and fast to use
- Individual functions for task checking
- Add-On on Office Suite

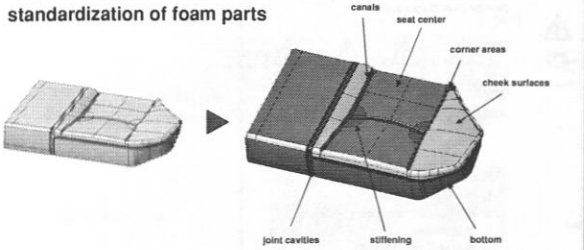
Project Meetings & Documentation

- TeamRoom / Lotus Notes template
- Easy role concept
- Distributed Teams
- Platform independent

Unsere Aktivitäten

KEIPER CATIA V5

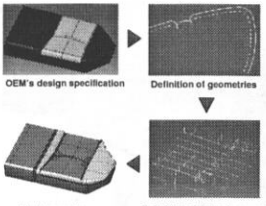
Step 1/2: classification and standardization of foam parts



Unsere Aktivitäten

KEIPER CATIA V5

Step 2/2: Development of 3D-CAD modeling workflows



Project-Tasks

- Analysis of the design process
- Identification of existing Best Practice design processes
- Standardization of CAD models and/or model areas
- Development of control procedures for CAD models
- Optimization of the geometry model use

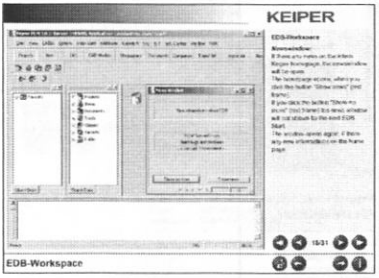
Goals

- Optimization of the 3D-CAD design process

Unsere Aktivitäten

KEIPER

New e-learning concepts



Requirements

- Increase acceptance and motivation for employees
- Reduce time for learning and keep a constant quality level of training
- Increase flexibility for training programms

Approach

- Modular structure of online courses
- Flexible and easy navigation within different contents
- Tailored for Keiper-specific CI layout

Unsere Überzeugung

KEIPER

- Es reicht nicht aus Standards zu definieren, man muß Sie auch in der Praxis einsetzen.
- Wenn alle sich auf ihre Prozesse konzentrieren und bereit sind über die Systemgrenzen hinaus zusammenzuarbeiten, dann ist es möglich Standards einzusetzen.
- Es ist einfacher den Zulieferer als verlängerte Werkbank zu definieren, aber ist es innovativ oder visionär?
- Förderung der Technologie in den Unternehmensprozessen ist ein Wettbewerbsvorteil.
- Die Zulieferer haben ihre eigenen Prozesse und optimieren diese ständig.
- OEMs und Zulieferer können die Anforderungen für die Zukunft nur gemeinsam lösen.

Unsere Aktivitäten

KEIPER

Es ist nicht genug zu wissen,
man muß es auch anwenden,
es ist genug zu wollen,
man muß es auch tun.

Goethe

Systempartnerschaft und Plattformen – gewichtige Aspekte für PLM!

Heinz–Simon KEIL

Siemens AG,Bereich Corporate Technology – Production Processes

Abstract

Einige der wichtigsten Trends für die nächste Dekade sind schnellerer Technologiewechsel, Vendoren, es ist vielmehr die treibende Kraft für Innovation, Technologietrends und Führerschaft bei Kosten und Qualität.

Keywords

Innovation. Product Lifecycle Management, Plattform, Systempartnerschaft

1 Siemens Referenz Prozess Haus

Das Thema Prozesse und immer stärker das Aufkommen von Prozessorganisationen führte während des „e-business hypes" zu den Überlegungen eines unternehmensweiten Prozess-Hauses, da sich in ihm die Aktivitäten kleinerer unternehmerischer Einheiten entlang von eindeutigen Prozessen und Inhalten abbilden lassen.

Die Vorteile sind eine klare Informations- und Kommunikationsinfrastruktur, klar geregelte Abläufe und somit eine resultierende Produktivitätssteigerung. Wechselnde Rollen, unter anderem auch von Führungskräften in den internen Ablaufprozessen als auch bei Lieferanten und Kunden, werden von persönlichen Eitelkeiten befreit und den Notwendigkeiten angepasst.

Die Harmonisierung und die Standardisierung von angewandten Methoden, Werkzeugen und Messparametern führen zur Minimierung von Administration und Infrastruktur.

Weiterhin müssen bei Umstrukturierungen nicht alle Aufgaben und Abläufe neu definiert werden, sondern eingespielte Prozesse können an neue Schnittstellen nahtlos „angeschlossen" werden. Dies hat für ein global agierendes Unternehmen viele Vorteile z.B. bei häufig notwendigen Umorganisationen und bei Integration bzw. Ausgliederung nach Käufen und Verkäufen kompletter Unternehmen beziehungsweise Unternehmenseinheiten.

Im nachfolgenden (Bild1) sehen sie die augenblicklich gültige Version des Siemens **R**eferenz **P**rozess **H**aus (RPH).

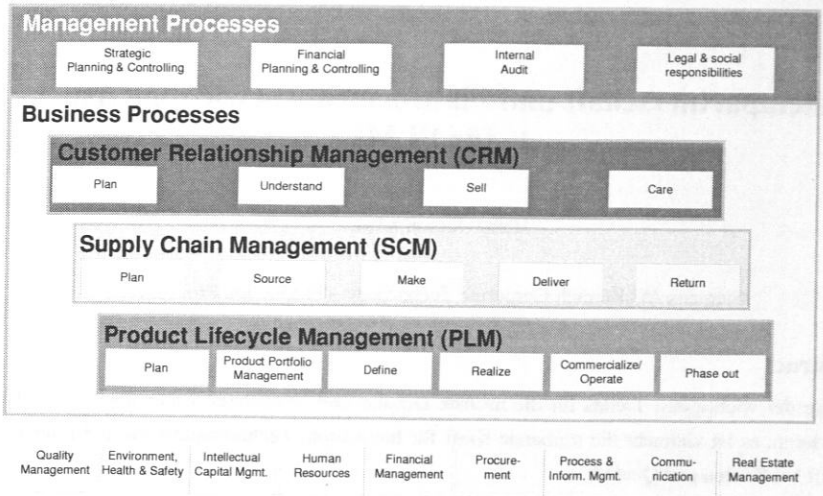


Abb.1: Siemens Referenz Process House (RPH)

Zusammenfassung zu Prozessen: „Biologische Systeme und Computersysteme zeigen uns, dass Grundvoraussetzungen für eine vernünftige, funktionierende Aufgabenverteilung klar definierte, fokussierte Abläufe und Prozesse sowie kompatible Schnittstellen und Protokolle sind". [1]

Aus ontologischer Sicht ist mit dem Modell auch gewährleistet, das alle Funktionen, Regionen und Partner die gleiche Sprache für ihre Prozessschritte sprechen.

Das Siemens Prozessrahmenwerk* bildet die Basis für ...

- Redesign der Prozesse auf Basis gemeinsam definierter **Standards** für **Soll-Prozesse**
- Realisierung der identifizierten **Einsparpotentiale** durch
  - beschleunigte Implementierung der **Standardprozesse**
  - **Harmonisierung** der Applikationen
  - Nutzung von **Synergieeffekten**
- Übergreifendes **Benchmarking** und **Best Practice Sharing**
- Gleiche Sprache und **gleiches Verständnis** der Prozesse im Konzern
- Konfiguration und Gestaltung von **spezifischen Geschäftsprozessen** (z.B. CRM, SCM, PLM)

1.1 Business Process "Product Lifecycle Management"

Der PLM-Prozess wird als Geschäftsprozess der treibende Aspekt für die Innovation sein. Deshalb definiert CIMdata PLM als:

"A strategic business approach that applies a consistent set of business solutions in support of the collaborative creation, management, dissemination, and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life, integrating people, processes, business systems, and information."

„Eine strategische Geschäftsmethodik, die es erlaubt einen einheitliche Set von Geschäftslösungen für die Unterstützung der Kommunikation, des Managements, der Vermarktung und des Gebrauch von Produktinformationen, für das ganze Unternehmen vom Konzept bis zur Abkündigung, bei Einbindung der Mitarbeiter, Prozesse, Geschäftssysteme und Informationen, zu gewähren."

Das heißt, dass im PLM alle Informationen so früh wie möglich in digitaler Form im Prozess zu Verfügung stehen und somit die Entscheidungsfindung überall auf der Welt mit gleichen Inhalten und den zuletzt durchgeführten Analysen, Untersuchungen und Sicherungsmethoden abgesichert ist.

In allen Phasen des Produktlebenszyklussees ist das Konzept des PLM fokussiert sich auf die Steigerung der Geschwindigkeit. Des Weiteren optimiert ein erfolgreicher PLM die Lebens-Zykluskosten und erfüllt folgende strategische Ziele:

- Erzeugt durch ein innovatives Produkt-Portfolio einen stetigen Fluss von wettbewerbsfähigen Produkten für den Markt
- Treffen von Zeit-, Qualitäts- und Kostenziele entlang des ganzen Produktlebenszyklus
- Schnelle Reaktionsfähigkeit auf sich ändernde Markt- und Kundenanforderungen

Diese strategischen Ziele sind gefährdet durch verschiedene Unzulänglichkeiten der gegenwärtig angewendeten Produkt-Entwicklungs-Prozesse (PEP's). Die allgemeinen PEP's (welche nur einen Teil des PLM abbilden) sind oft mit nicht produktiven Aktivitäten belastet, z. B.: Informationssuche, Datenformatierung und –konvertierung, Verantwortung- und Zuständigkeitsklärung, Doppel- und Mehrfacharbeit durch unklare Spezifikationen usw. Aber auch der richtige Zeitpunkt einer effektiven Go/no go- Entscheidung fehlt häufig, genauso werden die durchgeführten Prozesse häufig nach Intuition und Tradition gelebt. Die Konsequenz ist, dass sich der Prozess kaum wiederholt, somit keine Lernkurven vorhanden sind, die Optimierung nur bedingt erfolgt und das Erfüllen von Time to market fast unmöglich wird. Jede Entwicklung ist somit vom Prozess her anders und dient zur Abgrenzung.

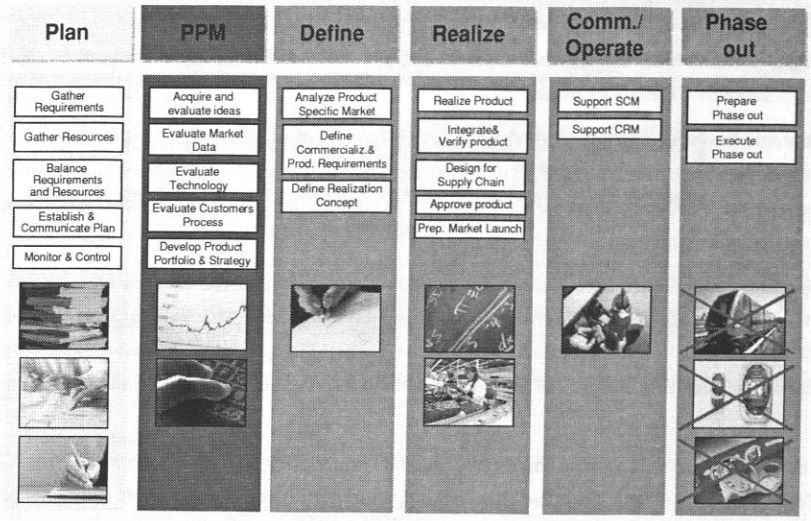


Abb. 2: Aufgaben/ Inhalte des Siemens PLM Prozesses

Um diese Unzulänglichkeiten zu entfernen, sind einige Hebel als Forschungs- und Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert worden.

1. Konsequente Prozessstandardisierung
2. Harmonisierung und Integration/enge Kopplung der Software Applikationen
3. Standardisierung der Datenformate/-sprachen

1.2 Vision: "Global Seamless Collaborative Engineering"

Der PLM -Prozess wird uns helfen, ein globales Engineering zu leben und soll die nachfolgend diskutierten Aspekte der Systempartnerschaft und des Einsatzes von globalen Produktplattformen unterstützen und helfen, die Vorteile der Technologieführer- und Kostenführernetzwerke optimal einzubinden. Dies alles benötigt eine nahtlose, globale Kommunikation zwischen den beteiligten Partnern.

Die beschriebenen Veränderungen haben viel Angriffspunkte/-hebel wie Produkte, Technologie, Prozesse, Strukturen und Mitarbeiter, welche noch mit von auswirkenden Elementen wie Kultur, Individuum, Gesellschaft, Politik, Umwelt, Wettbewerb und Ökonomie zu betrachten sind. Unter all diesen Aspekten sind die Veränderungen zügig aber unter Bedacht umzusetzen. Denn nur wer sich den Herausforderungen stellt, wird sie auch meistern.

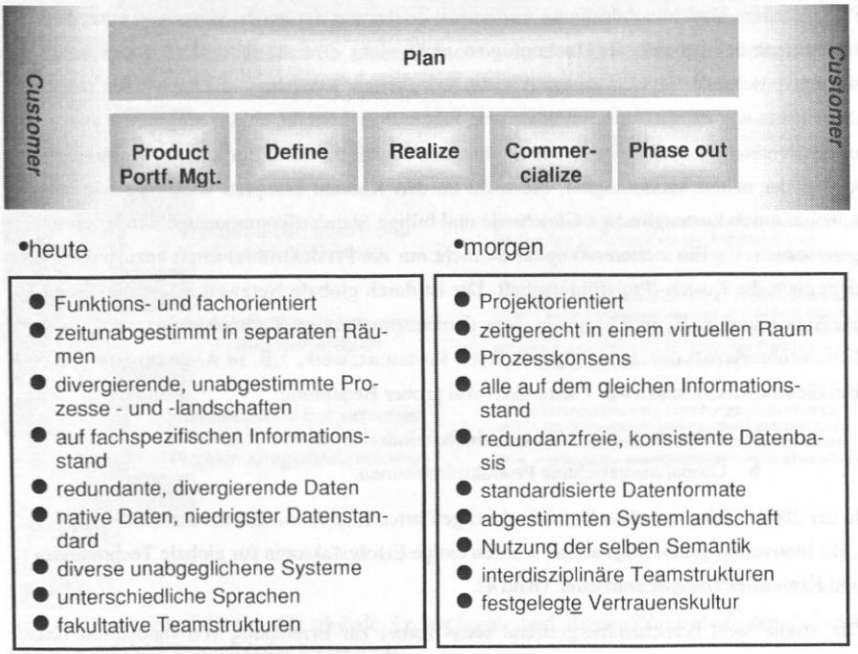


Abb. 3: Notwendige Veränderungen für einen nahtlosen , globalen Engineeringprozesses

2 Innovation

Innovation ist inzwischen weltweit ein geflügeltes Wort. Lassen Sie uns Innovation im Folgenden als den Prozess der Umsetzung von Ideen in eine marktreife Lösung bezeichnen. Es können dabei Produkte, System, Anlagen, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle innoviert werden. Zukünftig werden nur die Unternehmen dauerhaft erfolgreich sein und bleiben, die in der Lage sind, häufig, in den richtigen Schritten und zum richtigen Zeitpunkt gezielte Innovationen zu realisieren. Wenn wir über die Produkte (System, Lösung, Dienstleistung) reden, ist der Weg zum Produktlebenszyklus nicht weit. Die Lebenszyklusplanung wird in Zukunft das Mitentscheidende sein. Deshalb wird der PLM eine immer gewichtigere Rolle unter den Geschäftsprozessen einnehmen. Im Weiteren möchte ich auf zwei wesentliche Zeitfenster des Produktlebenszyklus eingehen. Das Erste ist der Schritt von der Produkteinführung bis zur Produktreife, den ich hier als den Zeitraum der Produkt- oder Technologieführerschaft bezeichnen möchte, und das zweite der Zeitraum von der Produktreife bis zum Produktauslauf, den ich als den Zeitraum der Kostenführerschaft bezeichne. In dem Zeitraum der Produktführerschaft liegen die Phasen der hohen und mittleren Gewinnmargen. Zu diesem Zeitpunkt stellt die Technologie ein Alleinstellungsmerkmal am Markt dar oder zumindest nur einen eingeschränkten Wettbewerb. Doch durch immer schnellere Innovationsgeschwindigkeiten

und globalere Marktdurchdringung werden die Zeitfenster der hohen Margen so kurz, dass die Investitionsrückflusszeit der Technologien nicht mehr erreicht wird. Jetzt kann man über dementsprechende Servicestrategien einen erweiterten Rückfluss erzeugen oder man geht dazu über, wie es die Automobilindustrie inzwischen betreibt, durch ausgefeilte Plattform- oder Gleichteilekonzepte Standardkomponenten soweit zu verbilligen, dass die Innovationskosten der neuen Technologien, die nicht an den Kunden komplett weitergegeben werden können, durch kostengünstige Gleichteile und billige Standardkomponenten wieder eingefangen werden. [2] Ein weiterer Weg ist es, nicht nur die Produktführerschaft anzustreben, sondern auch die Kosten-/Preisführerschaft. Die ist durch globale Netzwerke, wie die Technologieführerschaft z. B. in Europa in dem dementsprechenden Technologienetzwerk und die Kostenführerschaft mit dem entsprechenden Kostennetzwerk, z.B. in Asien zu erreichen. [3] Bei diesem Ansatz sind zwei Thematiken von großer Bedeutung:

a. Innovation durch Partnerschaften und
b. Global ausgerichtete Produktplattformen.

In der 2003/2004 von Arthur D. Little durchgeführten Innovation Excellence Studie 2004[4]: „Mit Innovation gegen Stagnation" wurden einige Erfolgsfaktoren für globale Technologie- und Kostenführerschaft erarbeitet. (Bild 4).

Die Studie sieht branchenübergreifend sechs Hebel zur Erreichung von Innovation Excellence:

- Ableitung ambitionierter Innovationsziele aus fundiertem Marktwissen,
- Identifikation und Auswahl geeigneter Innovationsfelder durch strukturiertes Ideenmangement,
- Plattformstrategien als Fundament der strategischen Planung von Produkt- und Technologieentwicklung,
- Durchgängig verknüpfte Innovationsprozesse mit exzellentem Produktentwicklungsprozess,
- Innovationsfördernde Unternehmenskultur und Mitarbeiter mit den passenden Kompetenzen,
- Messung und Incentivierung des Innovationserfolgs.

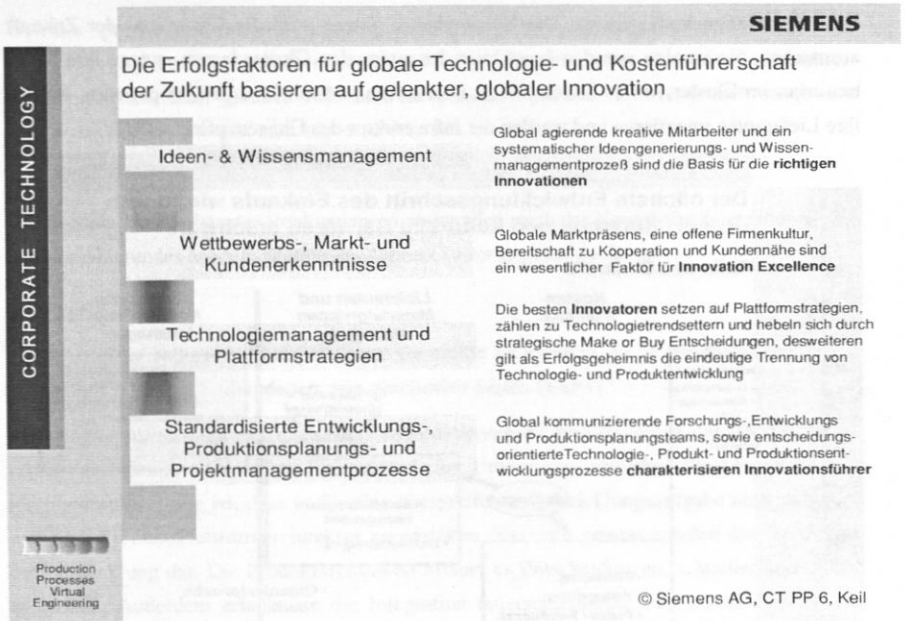


Abb.4: Die Erfolgsfaktoren für globale Technologie- und Kostenführerschaft der Zukunft basieren auf gelenkter, globaler Innovation

Zusammenfassend lässt sich sagen, das eine nach außen gerichtete Unternehmenskultur, der übergreifenden Einsatz von Plattformstrategien, zusätzliche Hebel wie strategische Make-or-Buy Entscheidungen, Zusammenlegung/globales Collaboration von Entwicklungsteams, strukturierte Meilenstein- oder Stage-Gate-orientierte Entwicklungsprozesse, kreative Mitarbeiter, systematisches Ideenmanagement und eine klare Trennung von ‚Produkt- und Technologieentwicklung die Top Innovatoren prägen.

3 Innovation durch Partnerschaft

Die immer schnelleren Innovationszyklen erfordern immer stärker die Forschung und Entwicklung von neuen Technologien und Produkten in firmenübergreifenden Netzwerken. Dazu eine These, die im Buch „Der Standortfaktor"[3] vertreten wird: „Die Gewinner im globalen Wettbewerb nutzen den Standort-Faktor". Standortfaktor heißt hier aber nicht der Faktorkostenvorteil bezogen auf die Lohn- und Strukturkosten, nein, es heißt hier den Netzwerkvorteil von Technologie-Clustern, die sich überall auf der Welt wiederfinden zu nutzen. Da es neben explizitem Wissen, das heute ausgiebig in Wissensmanagementsystemen dokumentiert wird, noch implizites Wissen in den Regionen gibt, das nicht wandert und nicht dokumentiert wird, werden sich Wissensnetzwerke immer regional halten. Diese Wissensnetzwerke mit den eingebundenen Unternehmen, Bildungsstätten, Infrastrukturen und natürlich Menschen sind von

hoher Innovationskraft geprägt. Die Netzwerke zu nutzen wird die Champions der Zukunft ausmachen. Sie werden von den Lead-User der regionalen Cluster lernen, nutzen ihre Wettbewerber im Cluster, um zu lernen, sie zu übertreffen und mit Ihnen zu kooperieren, werden ihre Lieferanten integrieren und werden die Infrastruktur des Clusters pflegen.[3]

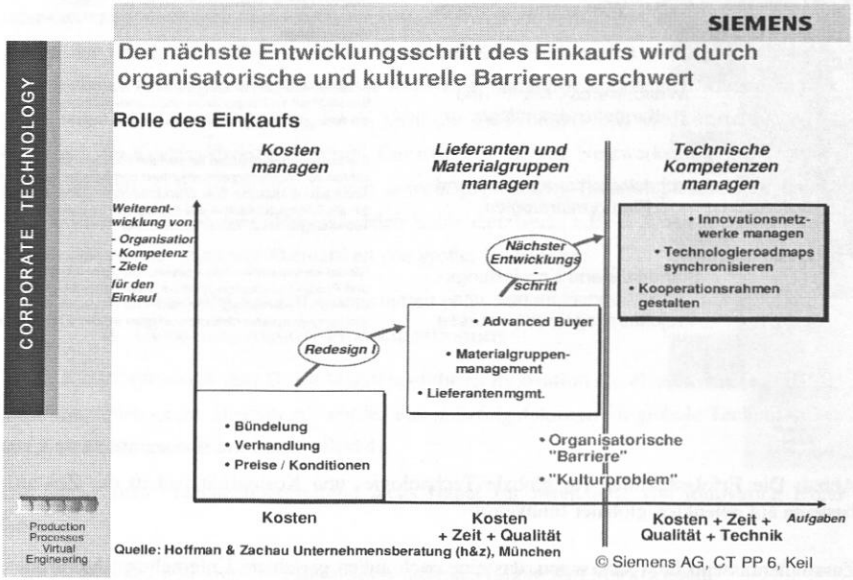


Abb. 5: Der nächste Entwicklungsschritt des Einkaufs wird durch organisatorische und kulturelle Barrieren erschwert.

Die Findung von Partnerschaften mit Lieferanten, Wettbewerbern, Forschungsinstituten, Hochschulen...wird momentan etwas gehemmt, da jede Form von Einkauf durch einen kompetenten, strategischen Einkauf erfolgen soll, dieser aber in den letzten Jahrzehnten, wie in Bild 3 aufgezeigt, nur nach kaufmännischen, das heißt vor allem nach Preisaspekten, nach Materialclustern und nach Preis ausgewählten „advanced buyer" betrieben wurde, wodurch bei der Qualifikation der Einkäufer stark auf kaufmännische Ausbildung und nur begrenzt auf technische Qualifikation geachtet wurde. Die Wirkungen des Lopez-Effekts verspürt die Automobilindustrie teilweise noch heute. Um die vorhandenen organisatorischen Barrieren und die Kulturschranken zu überwinden, werden sowohl organisatorische als auch mitarbeiterqualifikationsbezogene Maßnahmen ergriffen. In vielen Unternehmen wird das schon umgesetzt. Um unter Globalisierungsaspekten sich immer in der richtigen Phase des Produktlebenszyklus bewegen zu können, wird die Systempartnerschaft im Technologieführercluster genauso entscheidend sein, wie die Komponenten- und Modulpartnerschaft im Kostenführercluster. Wir werden nur durch das Betreiben dieser Netzwerkcluster und durch Nutzung des räumlichen, geografisch, kulturellen und fokussierten Netzwerkgedankens in den Industriezentren der

Welt das optimale Innovationspotential für eine dauerhafte Technologieführerrolle finden und durch Nutzung der Standortfaktorvorteile der Low-Cost Netzwerke auch die Kostenführerschaft erreichen. Oder glauben Sie, dass europäische Produkte für China noch interessant sind, wenn dort nicht etwas zum kopieren dran ist!

Lassen Sie uns das Kapitel mit Lothar Späth und Herbert Henzler [5]abschließen:

„Nicht mehr Nationalstaaten konkurrieren miteinander, auch der Kampf rivalisierender Multis ist ein auslaufendes Modell. Stattdessen treten Cluster gegeneinander an…"

4 Plattformen

Kann man Innovation als Motor für neue Geschäfte bezeichnen, so ist das Plattformkonzept das Öl, das Neues in Vorhandenem wie geschmiert laufen lässt[1].

Grundlage der produktübergreifenden Standardisierung ist die Gestaltung der Produktarchitektur (strukturelle Datensicht). Ein wesentlicher Unterschied zwischen Einzelprodukt- und Plattformentwicklung ist, dass es für eine übergreifende Entwicklungsaufgabe notwendig ist, eine sog. Produkt/Plattformarchitektur zu gestalten. Sie stellt gewissermaßen das Gerüst für die Entwicklung dar. Die Produktarchitektur erlaubt es Entscheidungen, schneller und besser zu treffen. Außerdem erlaubt sie die Integration unterschiedlicher Produkt-Modelle in ein Gesamtmodell. Die Darstellung von Produkten/Komponenten, Systemen und konfigurierbaren Lösungen in der Produktarchitektur:

- Produkte/Komponenten stellen die unterste Ebene einer Produktarchitektur dar. Diese Elemente können entweder durch technische oder funktionale Eigenschaften beschrieben werden.
- Konfigurierbare Systeme oder Module, sind physisch und/oder funktional zusammenhängende Ausschnitte der Produktarchitektur.
- Lösungen setzen sich aus mehreren Modulen/Systemen und/oder Komponenten zusammen

Die Unterscheidung in Gleich- oder Variantenteile erlaubt es, produktübergreifende Standardisierungskonzepte zu erstellen. Durch die produktübergreifende Analyse der Produktarchitektur lässt sich bestimmten, welche Elemente der Produktarchitektur Gleichteile sein sollen und welche Variantenteile.

Verbunden mit einer Modularisierung der Produktarchitektur lassen sich mit Hilfe der Produktarchitektur auch die Aspekte der Wertschöpfung, d.h. der Supply Chain abbilden. Dies ist insbesondere für die Analyse der „Built-to-Order"-Strategie notwendig.

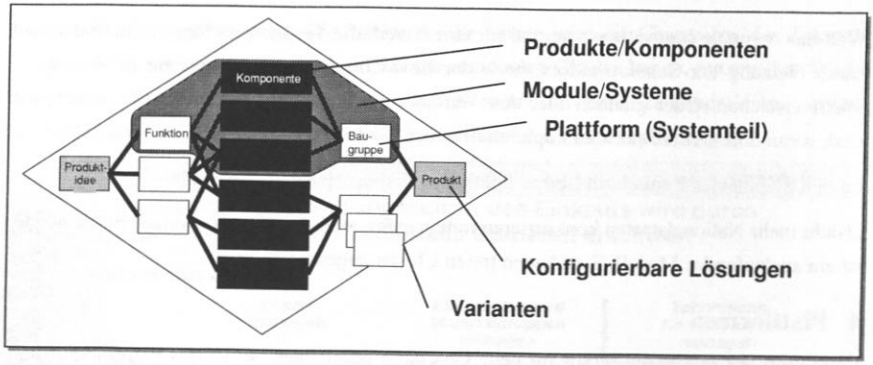


Abb. 6: Plattformarchitektur

Weshalb dieser Ausflug in die Tiefen der Produktplattformkonzeption. Sie soll zeigen, dass wenn das Architekturmodell einer Plattform steht, Komponenten, Module, ...nach einer Anlaufzeit in die oben erwähnten Low-Cost-Netzwerke transferiert werden können und so bei gleicher Qualität aber reduzierten Kosten zu Gesamtoptimierung der Plattform einen wesentlichen Anteil beitragen. Werden Plattformkonzepte eines Unternehmens zukunftsweisend aufgebaut, lassen sich trotz Mooreschen Gesetz veraltete Hardware- und Software-Module ersetzen, was für die Innovationsgeschwindigkeit der Zukunft, wie auch für die Kundenanpassungswünsche, aber auch der vom Markt gewünschten Variantenvielfalt sehr zuträglich ist. Zukunftsweisende Plattformkonzepte werden die globale Ausschöpfung der diversen Technologie-/Produktführer- und Kostenführercluster vermehrt nutzen, um zum richtigen Zeitpunkt die richtige Technologieposition mit marktkonformen Preisen im jeweiligen Marktsegment anzubieten.

5 PLM - Product Lifecycle Management

Die Idee hinter Product Lifecycle Management ist:

- Gestaltung und Befähigung eines dynamischen Umfelds mit dem eindeutigen Ziel, die Profitabilität eines Produkts entlang des kompletten „Life-Cycle" zu optimieren sowie die vom Kunden erwartete Wertsteigerung anzubieten .
- Der „Life-Cycle" beginnt mit der ersten Produktidee, mit dem „Sonnenaufgang" und reicht bis zur Produktabkündigung, dem „Sonnenuntergang"
- PLM definiert einen strikt prozessgetriebenen Blick auf den Produktlebenszyklus. Funktionale und strukturelle Aspekte sind momentan nicht im Fokus.
- Innerhalb der PLM-Prozessbeschreibung sind Rollen und Messgrößen für einen universellen, idealen Produktlebenszyklus geklärt und zugewiesen.

Ziel der Innovation ist es, einen erhöhten Kundennutzen zu generieren und diesen dann auch in die Kostenführerschaft zu überführen, unter der Bedingung einer kurzen, reibungslosen Übergangsphase ohne Gefährdung der Wettbewerbsfähigkeit.

Kundenzusatznutzen bedeutet:

a. Time to market
b. Local content
c. Einheitliches „Look & Feel"
d. Stimmiges Produktportfolio
e. Geringere Life cycle costs
f. Customization-Fähigkeit
g. Alleinstellungsmerkmale
h. ...

Kostenführerschaft bedeutet:

a. Nutzung von Faktorkostenvorteilen
b. Steigerung der Produktivität (Faktoreinsatzeffizienz)
c. Nutzung der Scalierungseffekte
d. Globale Erschließung der Beschaffungsmärkte
e. ..

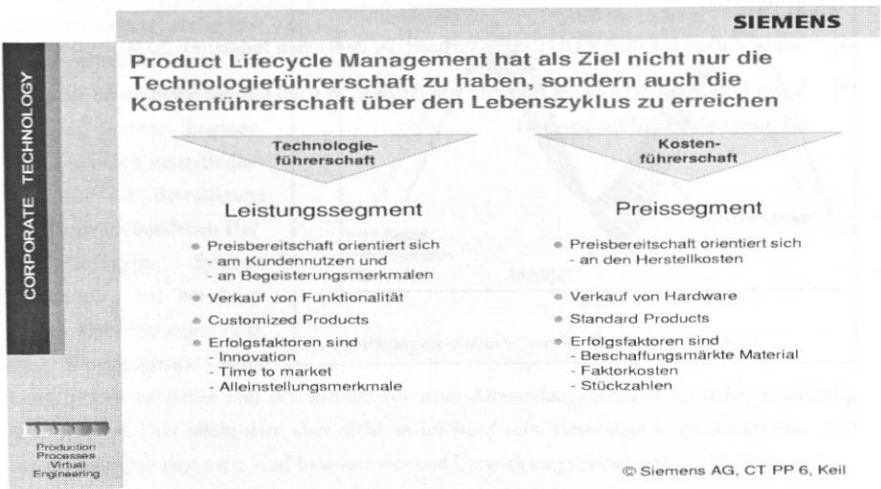


Abb. 7: Technologieführerschaft versus Kostenführerschaft

6 Fazit

Die Weltwirtschaft befindet sich in einem radikalen Umbruch, traditionelle Märkte stagnieren, globale Märkte entstehen. Geschäftsprozesse werden mobiler, flexibler, schneller. Gefragt sind neue Ideen, Innovationen für neue Geschäfte, neue Produkte für eine globale Welt. Die Geschwindigkeit und Wandlungsfähigkeit von Unternehmen neue Prozesse, Kooperationen, Innovation und Märkte zu bedienen werden zum Überlebensfaktor. Think global, act local erhält unter dem Aspekt von Technologie- und Kostenführernetzwerken, aber auch unter den lokalen Marktanforderungen ein neues Gewicht.

Lassen sie uns die Veränderung zusammenfassen nach dem Prinzip von Charles R. Darwin:

„It is not the strongest of the specie that survives, nor the most intelligent, but rather the one that is most adaptable to change"

Literatur

[1] Berner Georg; Management 20XX. Publics Corporate Publishing, Erlangen, Erlangen 2004

[2] Philipp Radtke, Eberhard Abele, Andreas E. Zielke; Die smarte Revolution in der Automobilindustrie Frankfurt/Wien: Redline Wirtschaft bei uebereuter,2004

[3] Holger Schiele; Der Standortfaktor, Wiley-VCH Verlag GmbH &Co, KGaA, Weinheim, 2003

[4] Studie Arthur D Little, BDI (Bundesverband der deutschen Industrie); 2004

[5] Späth Lothar, Henzler H..A., Jenseits von Brüssel. Warum wir die europäische Idee neu erfinden müssen, München 2001

Dynamische Entwicklungsprozesse als Antwort auf veränderte Marktanforderungen

Heinz RYBAK

MDTVISION GmbH, München

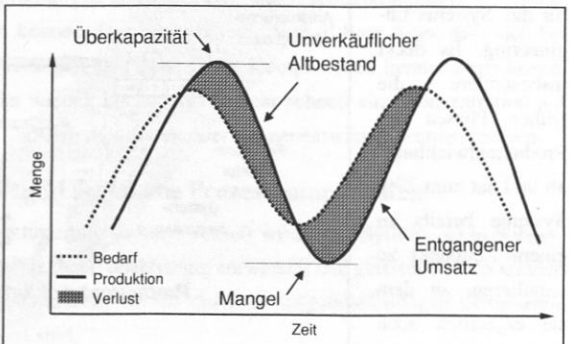
Keywords

Entwicklungsmethodik, Innovationsmanagement, Mechatronik, Projektmanagement, Systems Engineering

1 Rahmenbedingungen

Bei der Entwicklung neuer Produkte werden mechanische Komponenten zunehmend durch mechatronische Systeme ersetzt. Gleichzeitig wird der größte Teil der Produktinnovation über die Entwicklung bzw. Integration von Elektronikkomponenten realisiert. Zwangsläufig erfolgt auch die Alleinstellung neuer Produkte in immer größerem Maße über die Elektronik und insbesondere über deren softwaregesteuerte Features.

Die Komplexität der Produktentwicklung steigt dadurch erheblich und bekannte Vorgehensweisen wie das Systems Engineering gewinnen neue Bedeutung für die Bewältigung der damit verbundenen Herausforderungen. Systems Engineering hat bei komplexen Entwicklungen (z.B. im Flugzeugbau) seine Tauglichkeit bewiesen und der Einsatz für neue Anwendungsbereiche ist daher notwendig und sinnvoll. Dies allein wird aber nicht ausreichend sein. Besonders in der Elektronik- und der Konsumgüterindustrie sind Innovations- und Entwicklungszyklen extrem kurz geworden - unter anderem wegen der schnellen Änderungen des Verbraucherverhaltens und nur schwer vorhersagbarer Marktschwankungen. Produktentwicklungsprozesse müssen daher schneller als je zuvor an veränderte Randbedingungen angepasst werden, ohne dass dadurch beispiels-



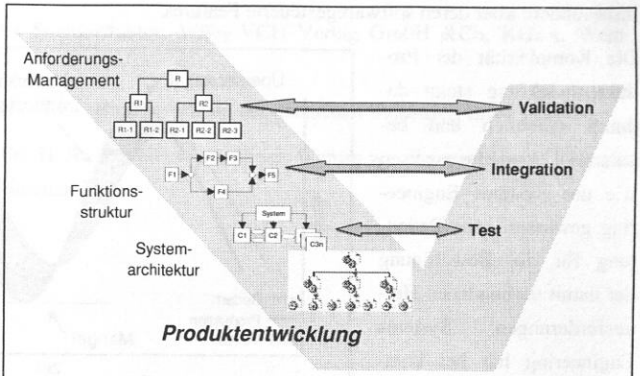
Auswirkungen unzureichender Reaktionsfähigkeit

weise die Qualität der Produkte leidet, Produkte an den Bedürfnissen des Marktes vorbei entwickelt werden oder einfach zu spät verfügbar sind. Hier stößt Systems Engineering - bei aller Notwendigkeit - an Grenzen, sofern es isoliert betrachtet wird. Dies gilt ebenso für die klassische Vorgehensweise des Prozess-Reengineering. Die Optimierung der Entwicklungsprozesse dauert im Zweifelsfall länger als es der aktuelle Marktzyklus erlaubt. Erschwerend kommt hinzu, dass auch Aufgabenfelder wie Innovationsmanagement und Supply Chain Management wesentlich stärker als bisher mit den Produktentwicklungsprozessen integriert werden müssen.

2 Systems Engineering

Auf diese Anforderungen kann nur mit flexiblen und dynamischen Vorgehensweisen reagiert werden. Dabei ist neben der Wiederverwendung von Produkten oder Teilprodukten die zusätzliche Wiederverwendung von Systemen, Subsystemen, Funktionen und Lösungsprinzipien eines der wesentlichen Elemente. Auf Grund der immer kürzeren Produktentwicklungszeiten kann es gar nicht sein, dass neue Produkte in Gänze neu entwickelt werden. Die Zeit steht einfach nicht zur Verfügung, um ständig alles neu zu erfinden oder zu entwickeln. Und eine Beschränkung auf die herkömmlichen Wiederverwendungskonzepte wird nicht ausreichen. Überlegt werden muss, wie mit neuen Methoden in weit größerem Maße auf Vorhandenes zurückgegriffen werden kann.

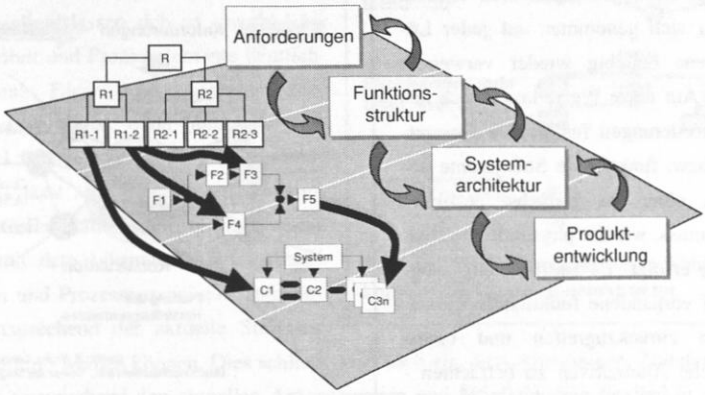
Die Basis bietet dafür das Systems Engineering. Es deckt insbesondere die frühen Phasen der Produktentwicklung ab und hat zum Ziel, Systeme bereits zu einem Zeitpunkt zu simulieren, an dem sie eigentlich noch nicht existieren.



Abhängigkeiten beim Systems Engineering

Dies beinhaltet, dass Systeme strukturiert und modularisiert werden und über entsprechende Abstraktionsmethoden letztlich eine formale Beschreibung erfolgt. Diese formale Beschreibung beinhaltet bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Festlegung der notwendigen Analysen, Simulationsmethoden und Werkzeuge und natürlich die Systemoptimierung - nicht zu vergessen die Beschreibung geeigneter Validations- und Testszenarien.

Dabei werden aus den Anforderungen heraus zunächst die entsprechenden Funktionen und Funktionsstrukturen abgeleitet. Im nächsten Schritt werden auf dieser Basis die entsprechenden Systeme und Subsystem definiert und ggf. aus verschiedenen Alternativen ausgewählt. Im letzten Schritt werden daraus die entsprechenden Produkte entwickelt.



Zuordnung von Anforderungen zu Funktionen und Systemen

Es entsteht also auf Basis einer einheitlichen und bereichübergreifenden Vorgehensweise ein Zusammenhang zwischen Anforderungen und Produkten oder Produktkomponenten, die beliebig wiederverwendet werden können. Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass sich bei neuen oder veränderten Anforderungen sehr schnell die Komponenten herausfiltern lassen, die unverändert weiterverwendet werden können. So ist sehr schnell eine Konzentration auf die Komponenten möglich, die wirklich modifiziert oder gar neuentwickelt werden müssen.

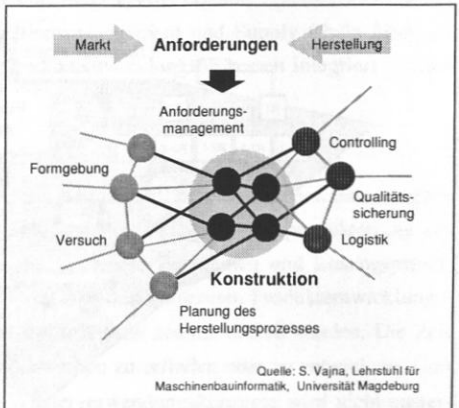
3 Autonome Subsysteme und autonome Prozesskomponenten

Sinnvoll ist es, wenn diese Strukturierung dadurch vertieft wird, dass Systeme so in Subsystem unterteilt werden, dass sie weitgehend unabhängig entwickelt und getestet werden können [PoGa]. Damit wird ein Weg beschritten, wo für diskrete Aufgabenstellungen umfassende Lösungskomponenten vordefiniert sind.

Diese Komponenten müssen unter anderem Informationen enthalten über:

- Anforderungen, die für die Entwicklung der vorliegenden Lösung Ausgangspunkt waren,
- Funktionen und Funktionsstrukturen, die die Lösungsprinzipen darstellen,
- Systeme und Subsysteme, die der Realisierung zugrunde liegen und
- die realisierten Komponenten inklusive aller Informationen über Entwicklung und Produktion. Hilfreich ist natürlich auch, dass das erforderliche Know-how für die

Bearbeitung mitgegeben wurde. Auf diese Weise kann z.B. der jeweils geeignetste Zulieferer mit in die Produktentwicklung integriert werden. Weitere Optimierung ist möglich, wenn die entsprechenden Lieferanten auch mit ihren Kapazitäten und mit ihren eigenen Planungsdaten enthalten sind.



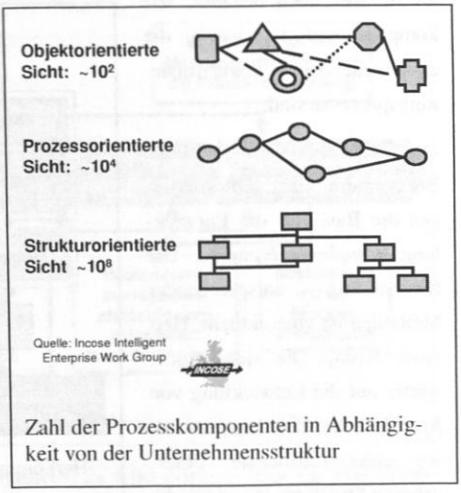
Dynamische Prozessgestaltung

Derartige Lösungskomponenten können dann für sich genommen auf jeder Lösungsebene beliebig wieder verwendet werden. Auf diese Weise lassen sich aus den Anforderungen funktionale Gesamtlösung bzw. funktionale Subsysteme ableiten, ohne das zunächst bestimmt werden muss, wie die physikalische Realisierung erfolgt. Es ist frühzeitig möglich, auf vorhandene funktionale Einzellösungen zurückzugreifen und unterschiedliche Alternativen zu betrachten - unter der Voraussetzung, dass die entsprechenden Informationen bzw. Zusammenhänge zwischen Anforderungen und Funktionen bereits einmal definiert worden sind. Vorteil ist, dass sich auf formaler bzw. funktionaler Ebene komplexe und bereichsübergreifende Lösungen vorselektieren und sogar simulieren lassen. Im weiteren Prozess kann auf der Ebene der Systemarchitektur und natürlich bei der Produktentwicklung ebenfalls Vorhandenes wieder verwendet werden. Auf dieser Basis lassen sich schließlich Systeme entwickeln, die wesentlich robuster gegenüber Veränderungen sind - sowohl hinsichtlich veränderter Anforderungen als auch hinsichtlich veränderter Prozesse. Denn letztlich ist mit der Autonomisierung der Subsysteme auch die Autonomisierung der Prozesse verbunden. Diese verbundenen Prozesselemente können ebenso wie Produktkomponenten flexible in neue Prozesse integriert werden, lassen sich aber ebenso gezielt und ohne größere Auswirkungen auf die Umwelt austauschen. Dies ist unter anderem eine der Voraussetzungen für das Outsourcing von Teilaufgaben.

4 Objektorientierte Betrachtungsweise und dynamische Prozesse

Die Aufteilung von Gesamtprozessen in standardisierte und autonome Subprozesse bzw. Prozesskomponenten, die ihrerseits je nach aktueller Anforderung beliebig miteinander kombinierbar sind, kann verglichen werden mit dem Prinzip der Modularisierung bei der objektorientierten Programmierung. Je mehr die Komponenten autonom arbeiten, desto weniger sind sie von externen Veränderungen beeinflusst bzw. Änderungen oder Austausch von Komponenten (wie z.B. durch Outsourcing) haben nur geringen Einfluss auf den Gesamtprozess.

Auf dieser Basis können dann letztlich sogar sog. „Prozess-Templates" - oder wenn man so will - Prozessklassen definiert werden, die sich mit geringem Aufwand an aktuelle Anforderungen anpassen lassen. Und vor allem lassen sich so sowohl Lösungsvielfalt und Prozesselemente deutlich reduzieren. Diese komponentenbasierte Vorgehensweise ist dann ihrerseits der Schlüssel für die Dynamisierung der Prozesse. Es lässt sich letztlich ein dynamisches „Collaborative Environment" aufbauen, mit dem Lösungen, Lösungskomponenten und Prozesse quasi auf Anforderung entsprechend der aktuelle Situation „konfiguriert" werden können. Dies schließt dann auch ein, dass Abteilungen, Zulieferer, Lieferanten entsprechend den aktuellen Anforderungen und Möglichkeiten flexibel in dynamische Prozesse integriert werden können.



Zahl der Prozesskomponenten in Abhängigkeit von der Unternehmensstruktur

5 Ist-Situation

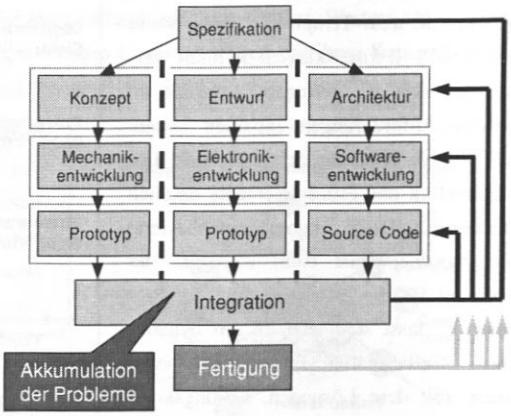
Ein Blick auf die gegenwärtige Situation zeigt aber, dass die Entwicklungsmethoden noch immer entweder an der Software- oder der Elektronik- oder der Mechanikentwicklung orientiert sind. Aufgaben werden für die jeweiligen Bereiche isoliert gelöst und die Architektur von Systemen wird noch immer durch die Subsysteme definiert - also von unten nach oben. Dies verhindert, dass bei der Neuentwicklung sinnvolle Alternativen berücksichtigt werden. Zwangsläufig werden die so genannten traditionellen Lösungen fort entwickelt, anstatt dass neue Lösungsalternativen integriert werden. Die Optimierung von Lösungen wird so deutlich erschwert, wenn unterschiedliche Technologien miteinander kombiniert werden sollen.

Wo werden bei einer bestimmten Aufgabenstellung die Funktionalitäten angesiedelt? In der Software, in der Elektronik oder in der Mechanik? Wird überhaupt nach Alternativen aus den anderen Bereichen gesucht?

Die Subsysteme bleiben also Herrscher über das Gesamtsystem - mit all den damit verbunden Problemen - z.B. der mangelnden Wiederverwendbarkeit. Hinzu kommen die unzureichenden Möglichkeiten, Gesamtsysteme in ausreichendem Maße zu simulieren und zu validieren - nicht zu reden von langen Entwicklungszeiten. Wesentliche Ursache ist, dass es heute noch keine einheitliche, alle Bereiche umfassende Systembeschreibung und Formalisierung gibt - geschweige denn ein einheitliches Modell. STEP ist hier ein geeigneter Ansatz.

Es ist aber auch bekannt, wie komplex und langwierig die entsprechenden Standardisierungsprozesse sind.

Dennoch bleibt die einheitliche Betrachtung aller Anforderungen die Basis für die Entwicklung komplexer Systeme. Die Realisierung entsprechender Methoden ist eine aktuelle Herausforderung, die sich gegenwärtig auf die Entwicklung von SysML [SysML] konzentriert, wo unterschiedlichste Unternehmen Standards für genau die oben beschriebene bereichsübergreifende Beschreibung von Systemen entwickeln.



Herkömmliche Vorgehensweise bei der Produktentwicklung

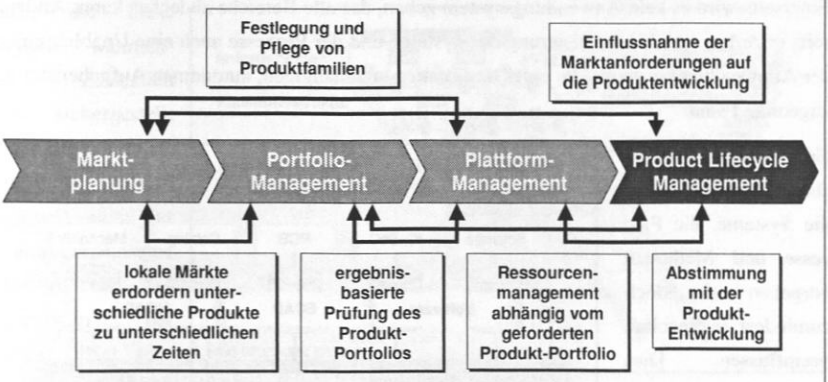
6 Die Rolle des Projektmanagements

Man muss sich darüber hinaus im Klaren sein, dass dynamisches Vorgehen in gewissem Maße Unschärfen verursachen wird. Die Schnelligkeit bei der Anpassung und Neukonfiguration von Systemen und Prozessen wird nicht immer reibungslos bzw. deterministisch funktionieren können. Kennzeichen sind beispielsweise Koordinationslücken bzw. zusätzlicher Abstimmungsbedarf.

Unter anderem wird in einer Studie von McKinsey [McKin] betont, dass die genannten Herausforderungen nur durch geeignetes Projektmanagement abgedeckt werden können. Dies wird natürlich umso besser möglich sein, je unfangreicher und präziser die einzelnen Prozesselemente und Komponenten bereits vordefiniert bzw. bekannt sind. Entsprechend hoch dürfte in der Zukunft der Bedarf an qualifizierten Projektingenieuren sein.

7 Innovationsmanagement

Es soll an dieser Stelle ebenfalls betont werden, dass die Dynamisierung der Prozesse nicht beim Product Lifecycle Management stehen bleiben kann. Es muss im Vorfeld gelingen, Ideen zu produzieren und die entsprechenden Innovationen effizient in profitable Produkte umzusetzen [KaRy]. Themen wie Marktplanung, Plattform- oder Portfolio-Management haben dabei eine wichtige Bedeutung. Erst ein entsprechender Informationsaustausch zwischen diesen Aufgabenbereichen und der Produktentwicklung kann Flexibilität und Reaktionsvermögen sicherstellen.



Abgängigkeiten zwischen Innovationsmanagement und Product Lifecycle Management

Die Abhängigkeiten sind in der Graphik dargestellt. Es wird deutlich, dass die Produktentwicklung nicht aus sich selbst heraus Innovation sicherstellt, sondern durch die der Produktentwicklung vorgelagerten Bereiche ganz wesentlich beeinflusst werden. Dies betrifft sowohl den unmittelbaren Einfluss der Marktentwicklung auf die Definition der Anforderungen an ein Produkt als auch die Planung der notwendigen Kapazitäten für die Produktentwicklung und die Festlegung der Prioritäten hinsichtlich der zu entwickelnden und produzierenden Produkte - ebenfalls abhängig von den aktuellen Bedürfnissen des Marktes.

Das Product Lifecycle Management kann also keinen Beitrag zur Dynamisierung der Prozesse liefern, sofern nicht die richtigen Informationen bzw. die richtigen Anforderungen durch die vorgelagerten Aufgabenbereiche erarbeitet werden. Andererseits nutzen die besten Ideen nichts, wenn anschließend keine geeignete Umsetzung erfolgt. Management der Innovation und das Product Lifecycle Management müssen also Hand in Hand gehen, und je früher eine Zusammenarbeit erfolgt, desto besser. In der Konsequenz müssen diese der Produktentwicklung vorgelagerten Bereiche ebenfalls in eine dynamische Prozessgestaltung einbezogen werden.

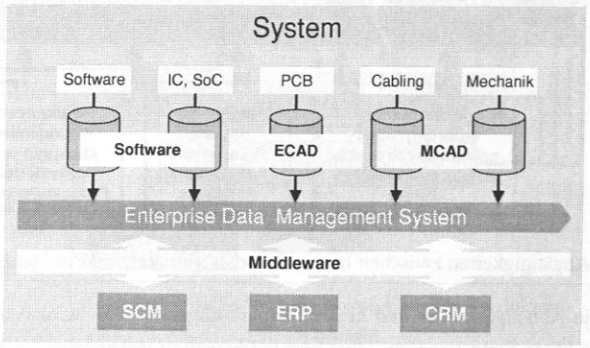
8 Implementierung

Die Komplexität der Aufgabenstellung erfordert natürlich nicht nur eine geeignete Festlegung der Entwicklungsmethoden und der Prozesse. Wichtig sind daneben geeignete IT-Architekturen für die Implementierung.

Zunächst müssen die jeweiligen Entwicklungswerkzeuge miteinander integriert werden. Hier bestehen in den jeweiligen Bereichen genügend Erfahrungen. Eine dynamische Konfiguration erfordert allerdings eine bereichsübergreifende Integration, die zwangsläufig eine Intensivierung der Schnittstellenentwicklung nach sich ziehen muss.

Einerseits wird es kein Anwendungssystem geben, das alle Bereiche abdecken kann. Andererseits erfordert eine Modularisierung der Systeme und der Prozesse auch eine Unabhängigkeit der Annwendungssysteme, die einer bestimmten unabhängigen, autonomen Aufgabenstellung zugeordnet sind.

Gegenwärtig sind es aber oft noch immer die Systeme, die Prozesse und Methoden vorgeben oder doch zumindest maßgeblich beeinflussen. Dies liegt unter anderem auch an der fehlenden Funktionalität der verfügbaren API's. Die Dynamisierung der Prozesse erfordert aber eine andere Vorgehensweise. Wenn Prozess und Systemkomponenten flexibel und autonom eingesetzt werden sollen, können die Anwendungssysteme zwar den Prozesskomponenten zugeordnet werden, aber sicher nicht mehr einer gesamten Produktentwicklung.



Allgemeine Systemarchitektur (Beispiel)

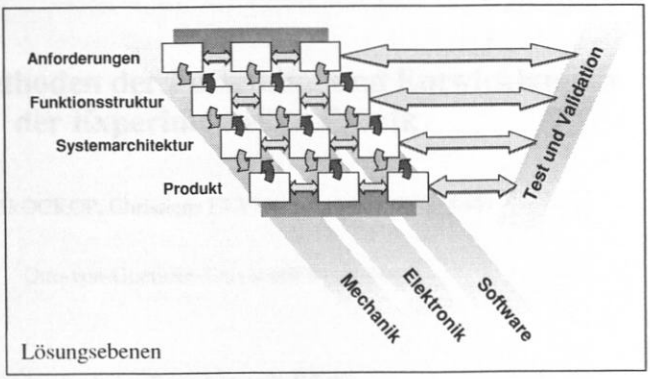
Anders sieht es aus mit den übergreifenden IT-Strukturen. Hier werden Lösungen gefordert, die quasi als einheitliche Basistechnologie die Integration der Prozess- und Systemkomponenten überhaupt erst sicherstellen.

9 Ausblick

Die veränderten Anforderungen des Marktes ziehen umfassende Eingriffe in den herkömmlichen Entwicklungsprozess nach sich. Dabei reicht es nicht mehr aus, vorhandene und vorgeblich bewährte Konzepte und Lösungen zu optimieren. Wie beschrieben müssen neue Lösungsansätze implementiert werden, die in letzter Konsequenz auch veränderte Denkmuster und Verhaltensweisen erfordern. Bei aller rationalen Betrachtungsweise darf nicht vergessen werden, das unterschiedlichste Welten miteinander integriert werden müssen - und damit auch unterschiedlichste Denkweisen und Erfahrungen.

Wie bereits betont, ist daher die Unabhängigkeit der Herangehensweise ein wesentlicher Gesichtspunkt. Es bringt in der Regel wenig, einen „Mechaniker" oder einen „Elektroniker„ nach Gesamtlösungen suchen zu lassen. Gefordert sind entweder Generalisten, die den Blick auf das Gesamte und nicht auf die jeweiligen Details richten, oder geeignete Integrations-

teams, die diese Aufgabe wahrnehmen. Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass die interdisziplinäre Zusammenarbeit nicht nur auf eine gemeinsame Definition der Anforderungen beschränkt bleibt, sondern sich über alle Phasen der Produktentwicklung erstreckt. Wird nach der Definition der Anforderungen bzw. nach Verteilung der Aufgaben wieder zu den alten Verhaltensmustern zurückgekehrt und ohne Abstimmung bis zum Ende weitergearbeitet (s.o.), muss der Ansatz des Systems Engineering und der Dynamisierung der Prozesse scheitern - wie es in der Vergangenheit leider zu oft geschehen ist. [Ryba]



Literatur

[KaRy] R. Kappler, H. Rybak; Innovation und Product Lifecycle Management; CAD-CAM-Report; 1/2004; Dressler-Verlag

[McKin] R. Holman, H.-W. Kaas, D. Keeling; The future of Product Development; The McKinsey Quarterly 2003; Number 3

[PoGa] S. Poledna, L. Gagea ; An Automotive Journey; ESSCIRC 2001, Villach - Austria

[Ryba] H. Rybak: Zuverlässiger durch PLM; Digital Engineering; 2/2004; WIN-Verlag

[SysML] SysML Overview - Draft Update; INCOSE/AP-233 Review; May 25, 2004 (www.sysml.org)

Moderne Methoden der Forschung und Entwicklung in der Experimentellen Fabrik

Sven BROCKOP, Christiane BEYER, Frank ENGELMANN

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Keywords

Open-Source-Entwicklungsumgebung, Experimentelle Fabrik

1 Einleitung

Die Experimentelle Fabrik (ExFa) wurde im Juni 2001 als Forschungs- und Transferzentrum für anwendungsorientierte Forschung auf dem Gebiet der Produkt-, Verfahrens- und Prozessinnovation eingeweiht.

In der ExFa forschen, erproben und realisieren Fakultäten der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, An-Institute und Wirtschaftsunternehmen konzentriert und interdisziplinär Technologien in den Leistungsfeldern:

- Produktentwicklungs- und Produktentstehungsprozesse,
- Material- und Prozessoptimierung zur Bearbeitungszeitverkürzung und Produktweiterentwicklung,
- Beschichtungstechnologien,
- Mikroproduktionstechnik,
- Managementtechniken zu Produktionsstrategien und technischen Innovationen,
- Betriebliches Lernen und Planen.

Entsprechend der wirtschaftlichen Struktur der Region Magdeburg, ist die Forschung vorrangig auf die mögliche Einbindung der Ergebnisse in Klein- und Mittelständige Unternehmen gerichtet. Leitgedanke der gemeinsamen Forschung in der Experimentellen Fabrik ist die Zusammenarbeit in einem Open-Source-Umfeld. Entsprechend dieses Leitgedankens wird am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik untersucht, wie die Idee der Open Source in der Produktentwicklung genutzt werden kann. Der Begriff „Open Source" bedeutet „offener Quelltext." Als Quelltext oder Sourcecode - vereinfacht der Bauplan des Programms - wird der von Menschen lesbare und änderbare Programmtext bezeichnet. Das maschinenausführbare Programm wird dagegen Binärcode genannt. Im ersten Teil dieses Beitrages soll die Open-Source-Softwareentwicklung untersucht werden. Hinter diesem Begriff verbirgt sich mehr als eine reine Vorgehensweise zur Softwareentwicklung, das beweisen die vielen Veröffentlichungen,

die das Thema aus soziologischer, ökonomischer und rechtlicher Sichtweise betrachten. Im zweiten Teil werden Vorschläge unterbreitet, wie die Idee der Open Source in der Produktentwicklung angewendet werden kann und wie in die Experimentelle Fabrik die Idee der Open Source zur Entwicklung neuer Produkte und zur Forschung bisher genutzt wird.

2 Open Source

Die Geschichte der Open-Source-Bewegung ist eng mit der Entstehung der Computer, der Software und des Internets verbunden. Mit sinkenden Hardwarekosten war es ab der Mitte der 1960-er Jahre auch Universitäten möglich, sich an der Forschung zu beteiligen. Dies betrachtet die Open-Source-Bewegung als ihren Beginn, wobei zu diesem Augenblick noch niemand von „Open Source" oder „Freie Software" sprach. Universitäten und deren Institute waren in der Lage, die Rechentechnik zur Lösung wissenschaftlicher Aufgaben einzusetzen. Dabei entstand eine Kultur des gegenseitigen Helfens. Die Wissenschaftler betrachteten Programme als ein Werkzeug der Forschung. [Mer]

Am Ende der siebziger Jahre wurde von der Industrie erkannt, dass Software kommerziell genutzt werden kann. Hard- und Software wurden ab diesem Zeitpunkt getrennt verkauft. Die Entstehung von proprietärer Software hatte zur Folge, dass der offene Austausch von Ideen nicht mehr möglich war. Die Forschenden und Lehrenden mussten ihre Kooperationen beschränken oder unterlassen. Mit diesem Zustand wollten sich viele Betroffene nicht abfinden. Unter ihnen war Richard Stallman, der 1984 die Free Software Foundation gründete. Die Ansichten Stallmans sowie die Lizenzbedingungen für Frei Software waren von den Werten und Haltungen der Hippie-Hacker-Kultur beeinflusst. Stallman verlangte Anfang der siebziger Jahre die radikale Demokratisierung des bürokratisch-elitär geregelten Zuganges zu den teuren Rechnern durch Vergesellschaftung des Vorhandenen. [Fre] Seine antikapitalistischen und eigentumsfeindlichen Äußerungen waren den Softwareherstellern oft zu radikal. Auch der Begriff „Freie Software" war missverständlich. Im Februar 1997 wurde auf der Palo Alto Hacker's Convention ein Konzept für freie Software vorgestellt, das sowohl die Bedürfnisse der Industrie als auch der Gemeinschaft der Hacker, wie sich die Programmiere Freier Software selbst bezeichnen, erfüllen konnte. Um sich von dem zweideutigen Begriff „Free Software" zu lösen, wurde der Begriff „Open Source" gewählt.

3 Motivation einer Open-Source-Entwicklung

Es hat den Anschein, dass Open-Source-Software einfach so entsteht oder die Hacker irrational handeln. Denn warum sollte jemand diese Arbeit machen, ohne dafür bezahlt zu werden?

Um das menschliche Handeln und den dabei auftretenden Widerspruch zu verdeutlichen, wird das spieltheoretische Modell des Gefangenendilemmas verwendet. Zahlreiche Wissenschaftler haben sich mit diesem Thema beschäftig. An dieser Stelle soll nur auf [Axe, Wei, Vog] verwiesen werden. In den Experimenten wurde festgestellt, dass Menschen nicht immer nach

dem ökonomischen Standardmodell (alle die Handlungen basieren auf Eigennutz und Rationalität) handeln, sondern durchaus kooperationsbereit sind. Warum geben die Hacker ihr Wissen preis und investieren viel Zeit in die Entwicklung neuer Software?

Wie bereits angedeutet, ist das menschliche Verhalten nicht nur rational geprägt, sondern wird oft durch Emotionen und Lebenserfahrung beeinflusst. Daraus resultiert das Wissen, dass kooperatives Verhalten nicht immer zu einem individuellen Nachteil führt. Kooperationsfähigkeit ist mit Begriffen, wie „Ehrlichkeit", „Verlässlichkeit" oder „Treue" verbunden. Das emotionale System verhilft den kooperativen Typen dazu, dass sie genug Kooperationsvorteile sammeln, um sich gegen die nicht-kooperativen zumindest behaupten zu können.Es ergeben sich für die einzelnen Hacker aber auch Vorteile, die nicht unbedingt im Monetären zu sehen sind. Um dies zu verdeutlichen, können die Nutzer und Entwickler von Software in drei Gruppen eingeteilt werden. [BoR] Zunächst gibt es eine große Gruppe von Nutzern, die nicht an der Entwicklung teilnehmen, sondern nur diese Programme verwenden. Eine zweite Gruppe sind Personen, deren Hobby der Computer ist. Die Motivation und die aufgewendete Zeit dieser Gruppe sind aber nicht ausreichend, um die Ergebnisse der Open Source Bewegung zu erklären. Um diesen Erfolg zu erklären, ist das Betrachten einer dritten Gruppe notwendig, deren Mitglieder der „Hacker Culture" angehören – und sich als Thronerben der „Real Programmers" der Nachkriegszeit, bestehend aus Ingenieuren und Physikern, sehen. [BoR] Die uneigennützige Entwicklung von Software kann den Hobbyentwicklern der zweiten Gruppe unterstellt werden, aber nicht den Mitgliedern der dritten Gruppe. Diese Entwickler verfolgen mit der Entwicklung andere, eigene Ziele. Die Produktion von Open-Source-Software ist für diese Gruppe eine Form wissenschaftlicher Forschung. Die Forschungsergebnisse werden der Gemeinschaft frei zugänglich gemacht und von dieser überprüft. Der Programmierer erhält ein Feedback und Anerkennung, wodurch seine Stellung in der Gemeinschaft steigt. Einige Programmierer betrachten sich als eine Art Künstler, die fähig sind, ein kompliziertes Problem zu lösen. Andere betrachten es als ein Vergnügen, kreativ zu sein. [BoR] Ein weiteres Motiv ist pragmatischer. Durch die Arbeit an Open-Source-Software können die Programmierer auf sich aufmerksam machen und ihre Kariere in einer Firma fördern. Die pragmatischen Gründe, die Verbesserung der Software für die eigenen Zwecke und die Verbesserung der eigenen Karriereaussichten sind wahrscheinlich die wichtigsten Gründe für die Tätigkeit in dieser Gemeinschaft. [BoR] Auch gewinnorientierte Unternehmen haben Vorteile, so wird nicht die Ware Software verkauft, sondern die Dienstleistung [Ray]. Ein einfaches Beispiel wäre das Verschenken eines Rasierapparates, um später die Rasierklingen zu verkaufen. Für Unternehmen, die Hardware herstellen, z.B. Drucker, ist die Bereitstellung der Treibersoftware aufwendig. Das Problem der Softwarepflege kann durch Freigabe des Quelltextes und der Förderung des Austausches durch den Kunden selbst gelöst werden. Der Anwender ist gleichzeitig Tester und Mitentwickler. Damit werden Programmierfehlern (Bugs) oder fehlende Funktionen schneller erkannt und können in das Programm eingearbeitet werden. So

werden die Kosten des Hardwareherstellers für das Entwickeln der Software erheblich gesenkt. Die Softwarehersteller können Dienstleistungen in Form von Handbüchern, Schulungen oder administrative Arbeiten verkaufen.

4 Die Open-Source-Entwicklungsumgebung

Obwohl die beteiligten Programmierer freiwillig mitarbeiten, ist ein Open Source Projekt weit davon entfernt eine anarchistische Gemeinschaft zu sein. Ein Open Source Projekt beginnt damit, dass eine Person oder eine Organisation ein Problem hat und eine spezielle Softwarelösung benötigt. Im nächsten Schritt werden in der Umgebung nach Personen gesucht, die dasselbe Problem haben. Es wird eine Kerngruppe gebildet, die das Problem bearbeitet. Es werden ein Ziel sowie der zeitliche Rahmen und die Ressourcen vereinbart oder vorgegeben. Im Verlaufe des Projektes wird das Zwischenergebnis im Netz durch Mailinglisten, Newsgoups oder andere Online-Dienste publik gemacht und auf Feedback gewartet. Auf diese Weise werden neue Ressourcen erschlossen. Durch die große Anzahl der beteiligten, freiwilligen Tester können Fehler in der Software schneller gefunden und die hintergründigen Probleme schnell behoben werden. Durch die offene Struktur (Abbildung 1) der Open-Source-Umgebung ist die interdisziplinäre Arbeit jederzeit gegeben. Jeder Interessent kann sich an der Bearbeitung beteiligen. Das Kernteam hat dabei die wichtige Aufgabe: die Moderation und das Management des Projektes. Aufgaben, wie die Repräsentation nach außen sowie die Kommunikation mit den externen Entwicklern können durch die gesamte Projektgruppe übernommen werden. Dabei wird die Projektgruppe selbst wiederum durch einen Projektmanager geleitet.

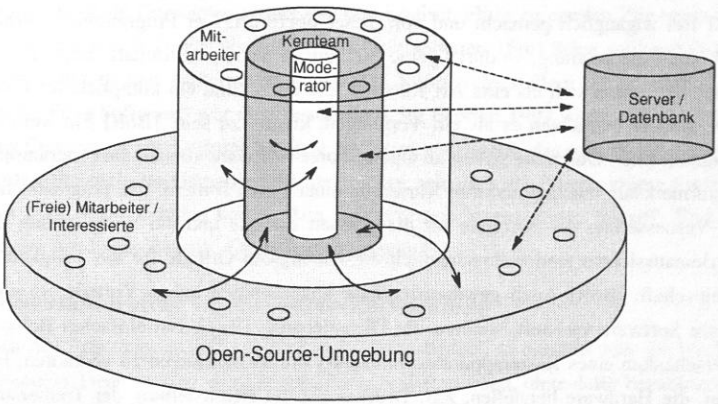


Abb. 1: Open-Source-Entwicklungsumgebung

Die allgemeinen Aufgaben des Projektmanagements sind klar umrissen. Es steht im Zentrum des Projektes und ist die Nahtstelle zu allen anderen Beteiligten sowie Ansprechpartner für

alle Mitglieder. In einer offenen Umgebung ist zu beachten, dass die Mitglieder zum Teil Freiwillige sind und damit andere Führungsqualitäten verbunden sind. Die Zusammensetzung des externen Teams kann sehr unterschiedlich sein und ist von der Art des Projektes sowie von den Zielen abhängig. Die Mitentwickler können gezielt angesprochen und um Mitarbeit gebeten werden oder die Entwicklung wird allgemein bekannt gegeben und jeder kann sich einbringen. Es muss dabei akzeptiert werden, dass jeder externe Mitarbeiter eigene Ziele verfolgt, eigene Interessen hat und der Projektmanager keine Weisung geben kann. Dem Projektmanagement fällt also eine besondere Rolle zu, da er auf die unterschiedlichen Charakter eingehen, zusammenführen und motivieren muss. Unterschiedliche Denkansätze, Vorgehensweisen sowie breit gefächertes Wissen und Fähigkeiten sind die große Chance eines Open-Source-Projektes.

5 Anwendungsfelder in der Produktentwicklung

In [Wei] werden Merkmale öffentlicher Güter und Clubgüter genant. Open-Source-Produkte weisen diese Merkmale auf. Für Software, die über das Internet herunter geladen wird, wird oft keine Gebühr erhoben, das entspricht einem rein öffentlichen Gut. Wird Software auf einem Datenträger erworben, werden die Kosten für den Datenträger und den Versand erhoben. Dies entspricht einem Clubgut, da ein Konsumausschluss (durch einen hohen Preis) möglich wäre. [Wei] In einer dritten Gruppe finden keine Rivalität im Konsum und kein Konsumausschluss statt. Die Lizenz einer Open-Source-Software darf keine Einschränkung in der Nutzung vorsehen. Es steht jedem offen die Software zu erwerben, zu kopieren und weiterzugeben. Der offene Quellcode ermöglicht das Modifizieren der Software, so dass diese uneingeschränkt zur Verfügung steht. Die Idee ist eine kollektive Entwicklung und Nutzung eines Gutes. Entsprechend diesem Ansatz können unterschiedliche Anwendungsfelder definiert werden.

5.1 Begriffe, Standards, Methoden und Vorgehensweisen

Durch die Entwicklung neuer Technologien oder Verfahren werden häufig neue Begriffe bzw. Bezeichnungen eingeführt. Jedoch sind die gefundenen Begriffe tatsächlich meist nur in einem abgegrenzten Bereich bekannt und gültig. Dies resultiert aus dem unterschiedlichen Verständnis und auch aus Interessenslagen der Personen [Grb]. Eine offene Diskussion kann schneller zu einem allgemein akzeptierten Ergebnis führen, als einander konkurrierenden Begriffe/ Diskussion.

5.2 Anwendung und Optimierung von Technologien

Die Einführung neuer Technologien ist oft mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Die Leistungsgrenzen und die optimale Nutzung der Geräte sind nicht immer bekannt. Es müssen zunächst Erfahrungen gesammelt werden. In einer Open–Source-Umgebung könnten Erfahrungen schnell ausgetauscht werden. Es wäre möglich, gemeinsam die Handbücher zu schrei-

ben und zu verbessern. Der in der Softwareentwicklung übliche Hinweis auf die Betaversion kann dabei helfen, unmissverständlich klar zu machen, dass sich die Technologie in der Entwicklung befindet.Es entsteht für den Technologielieferant und für den Anwender ein Vorteil. Der Lieferant bekommt praktische Anwendungen. Fehler und fehlende Funktionen werden schnell gefunden und können beseitigt werden. Der Anwender kann Einfluss auf die Technologie nehmen und für seine Anwendungen optimieren. Der Wettbewerb ist für Firmen ein Hemmnis, Spezialwissen zu veröffentlichen. Das Veröffentlichen kann aber auch ein Vorteil sein, denn sie können beweisen, dass die Firma die Technologie beherrscht. Es ist möglich, eine so genannte Pionierstrategie anzustreben.

5.3 Technologieverbund

Eine weitere Nutzung der Idee der Open Source liegt in der Erweiterung der Anwendungsfelder von Einzeltechnologien. Dies kann durch einem (regionalen) Verbund unterschiedlicher Anwendungen erfolgen.

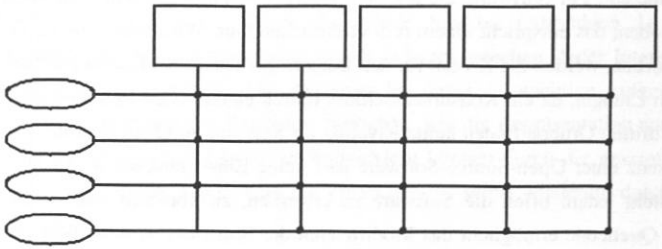


Abb.2: Technologieverbund

Dazu werden die Anwendungen, Grenzen und Entwicklungsziele der Einzeltechnologien ausgetauscht. Wie in der Matrix (Abbild 2) zu sehen, kann dann an den Kontenpunkten eine Verbindung von zwei Technologien untersucht werden. Alle Seiten können sich unabhängig von einander an der Untersuchung eines jeden Knoten beteiligen, so dass ein Maximum der vorhandenen geistigen Ressourcen genutzt wird.

5.4 Produktentwicklung/ -weiterentwicklung

In der Abbildung 3 wird die traditionelle Produktentwicklung dargestellt. Zu erkennen ist die starke Trennung zwischen den einzelnen Unternehmen sowie zwischen den Entwicklern und Kunden.

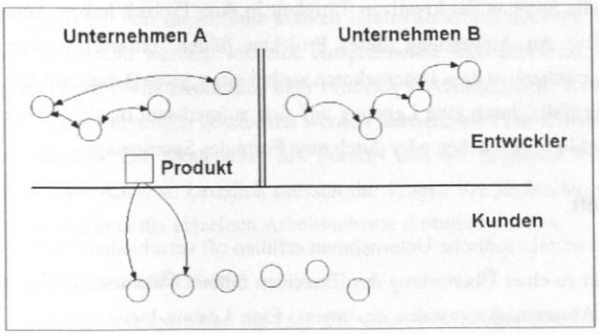


Abb. 3: Traditionelle Produktentwicklung

Im Unterschied dazu wurde in Abbildung 4 eine mögliche veränderte Produktentwicklung dargestellt. Neu ist die Teilnahme anderer Unternehmen, Kunden und nebenberuflicher Entwickler am Prozess der Produktentwicklung auf freiwilliger Basis – ähnlich der Softwareentwicklung in einer Open-Source-Umgebung. Virtuelle Organisationsformen haben zurzeit ihren Schwerpunkt auf der Zusammenarbeit in der Produktentwicklung zwischen Unternehmen, nicht aber auf Netzwerke mit Individuen/ Kunden. [ChL]

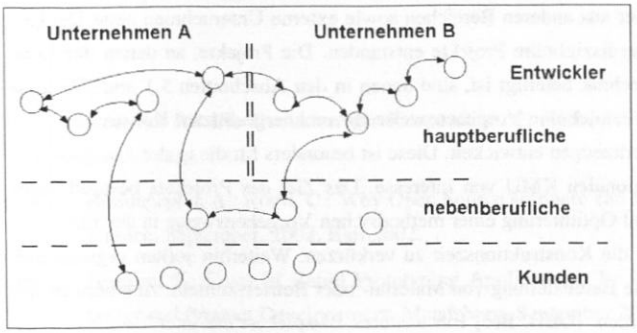


Abb. 4: Modell einer Open-Source-Umgebung in der Produktentwicklung

Diese Vorgehensweise ermöglicht es, ein Produkt besser zu entwickeln. In der traditionellen Entwicklung ist die Marketing- bzw. Vertriebsabteilung für den Kontakt zwischen den Kunden und den Lieferanten zuständig. Eine offene, direkte Kommunikation ist nicht immer möglich. Jeder einzelne Entwicklungsschritt kann diskutiert und Vorschläge eingebracht werden. Die notwendigen gewünschten Funktionalitäten können vom Kunden direkt genannt werden, und der Konstrukteur kann seine Entscheidung dem Kunden gegenüber vertreten. Dies kann zu einer höheren Akzeptanz führen.

Neben den Hobbyerfindern, die Spaß an der kreativen Tätigkeit in ihrer Freizeit haben, können auch pragmatische Motive zur Anwendung dieses Projektes führen. Einzelentwickler können auf sich aufmerksam machen, so dass Unternehmen sie bei einer guten Arbeit einstellen. Unternehmen können ebenfalls durch gute Leistung auf sich aufmerksam machen. Dies kann durch die direkte Entwicklung geschehen oder durch eine Form des Sponsorings.

5.5 Regionale Gemeinschaft

Die Mitarbeiter in Klein- und mittelständische Unternehmen erfüllen oft verschiedene Aufgaben zur selben Zeit. Dies kann zu einer Überlastung des Einzelnen führen. Neuentwicklungen oder das Erschließen neuer Absatzmärkte werden erschwert. Eine Lösung bietet ein Netzwerk, das entsprechend der Ideen der Open Source gestaltet wird. Firmen unterschiedlicher Bereiche können Erfahrungen auf einer Datenbank sammeln. Es könnten zum Beispiel Informationen über Kultur und Mentalität der Menschen ausländischer Absatzmärkte hinterlegt werden. Die Förderung anderer regionaler Unternehmen hat Vorteile für das eigene Unternehmen. Eine verbesserte Infrastruktur führt zu mehr Arbeitsplätze, die notwendigen Fachkräfte wandern nicht ab und stehen dem Unternehmen zur Verfügung.

5.6 Anwendung in der ExFa

Ausgangspunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der ExFa war eine Matrix eines Technologieverbundes entsprechend Abschnitt 5.3. Durch Offenlegung der eigenen Möglichkeiten konnten die Partner aus anderen Bereichen sowie externe Unternehmen neue Denkansätze finden, so dass interdisziplinäre Projekte entstanden. Die Projekte, an denen der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik beteiligt ist, sind denen in den Abschnitten 5.1 und 5.2 zuzuordnen. So wurde zum Beispiel eine Vorgehensweise zur rechnergestützten Konstruktion von Spritz- und Druckgießwerkzeugen entwickelt. Diese ist besonders für die in der Automobilzulieferbranche tätigen regionalen KMU von Interesse. Das Ziel des Projektes bestand darin, durch die Erarbeitung und Optimierung einer methodischen Vorgehensweise in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase die Konstruktionszeit zu verkürzen. Weiterhin sollten organisatorische Maßnahmen, wie die Bereitstellung von Material- oder Betriebsmitteln, zu einem frühen Zeitpunkt eingeleitet werden. [GBB, Bro] Ein weiteres Beispiel ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit zur Umsetzung einer neuen Methode zur Zahnextraktion. Das vorliegende Konzept wurde von einem Ingenieur und einem Zahnarzt entwickelt und patentrechtlich geschützt. Von Seiten der Forschergruppe wird dieses Konzept konstruktiv begleitet und dessen Umsetzung durch die Anwendung der in der EXFA zur Verfügung stehenden Möglichkeiten unterstützt. Dabei wurde die Prozesskette 3D-Digitalisierung — CAD-Modellierung — Prototypenfertigung angewandt. [ScK] Gegenwärtig ist ein Projekt zur Untersuchung der Produktentwicklung/ Produktverbesserung in Vorbereitung. Ziel ist es, die Form der Zusammenarbeit zwischen Einzelpersonen, siehe Abschnitt 5.4, unter Nutzung des Internets als Plattform, zu untersuchen. Im ersten Schritt wurde eine Internetseite erstellt, in der ein Diskussionsforum

integriert ist. Auf dieser Seite können Interessierte sich über die Teilprojekte informieren. Es soll untersucht werden, wie eine entsprechende Internetpräsenz gestaltet werden muss, um eine offene, breite Diskussion über Produkte zu ermöglichen. Weiterhin wird untersucht, welche Voraussetzungen geschaffen werden müssen, um eine offene Produktentwicklung zu gewährleisten. Die Moderation des Forums und der gesamten Internetseite ist ein wichtiger Punkt der Analyse. Letztlich müssen die Fragen der Einbindung und die Kompetenzen der Freiwilligen in die einzelnen Arbeitsschritte diskutiert werden.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag sollten die Idee der Open Source und deren mögliche Anwendung in der Produktentwicklung diskutiert werden. Es wurde gezeigt, dass die Mitglieder der Entwicklungsgemeinschaft sehr heterogen in den Fähigkeiten und Motiven sein können. Dies ist bei der Leitung eines Projektes zu beachten. Ein wichtiges Motiv bei der Open-Source-Entwicklung ist die Anerkennung durch das Kollektiv und die Steigerung der Bekanntheit. Die Organisationsform ist gut geeignet um Forschung und Entwicklung im öffentlichen Bereich zu fördern, z.B. im universitären Bereich. Von öffentlichem Interesse sind ebenfalls Begriffesdefinitionen und einheitliche Standards. Die Forschung über die Anwendung der Idee der Open Source in der Experimentellen Fabrik hat erst begonnen. Es hat sich bereits gezeigt, dass dieses Organisationsform geeignet ist, Forschung und Entwicklung zu fördern. In weiteren Projekten werden die zum Teil noch theoretischen Untersuchungen in die Praxis überführt.

Literatur

[Axe] Axelrod, R.: Die Evolution der Kooperation. 2. Aufl., Studienausgabe. München: Oldenbourg, 1991.

[BoR] Bonnaccorsi, A.; Rossi, C.: Why Open Source software can succeed. In: AICA Conference, September, 2002, Bari 2002.

[Bro] Bockop, S.: Costs of Rapid Prototyping Applications. In: 4. Workshop IPD 2002 Integrated Product Developement. Magdeburg, September 2002.

[ChL] Chan, t.-Y.; Lee, J.-F.: A copmparative study of online user communities involvment in product innovation and development. National Cheng Chi University, Taiwan Veröffentlicht auf: http://opensource.mit.edu/online_papers.php, Februar 2004.

[Fre] Freymuth: Offene Geheimnisse. Computermagazin c't; München, Hannover. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG Heft; 20/21, 2001.

[GBB] Grote, Karl-H.; Brockop, S.; Berkau, A.: Costs of Rapid Prototyping Applications. In: Proceedings of the 5th International Conference on Managing Innovative Manufacturing (MIM 2002), Milwaukee, Wisconsin/ USA, September 2002

[Grb] Grote, K-H.; Roßbach, J.-S.; Brike, C.: Brockop, S.-J.: Überwindung von Kommunikationsdefiziten - Effizientere Produktentwicklungsprozesse durch eine einheitliche Rapid-Prototyping-Terminologie beim Simultaneous Engineering. Tagungsband 5. Magdeburger Maschinenbau-Tage 19.09.-20.09.2001; Berlin Logos 2001.

[Mer] Meretz, S.: GNU/Linux ist nichts wert - und das ist gut so! In: Tagungsband Stuttgarter Linuxtage am 30.07.2000; Stuttgart 2000.

[Ray] Raymond, E. S.: The cathedral and the bazaar. 2. Auflage. Köln: O'Reilly 2001.

[ScK] Schwarz, R., Kluge, R.: The application of 3d-digitalization for the development of medical instruments. In: 4.Workshop IPD 2002 - Integrated Product Developement. Magdeburg, September 2002.

[Vog] Vogt, C.: Kooperation im Gefangenen-Dilemma durch endogenes Lernen. Hochschulschrift: Magdeburg, Univ., Fak. für Wirtschaftswiss., Diss., 2001.

[Wie] Weimann, J.: Wirtschaftspolitik : Allokation und kollektive Entscheidung. 3., überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2004.

Aspekte des Virtual Engineering im Schiffbau

Uwe VON LUKAS[1], Haygazun HAYKA[2], Guido SCHULTE[3]

[1]Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V., Rostock
[2]Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Berlin
[3]Aker Ostsee, Wismar

Abstract

Der Beitrag stellt wesentliche Ergebnisse aus dem BMBF-Projekt *InViS – Integrierter Virtueller Schiffbau* vor. Hierzu zählen das als XML-Schema codierte Datenmodell, die offene Integrationsplattform sowie verschiedene darauf aufbauende Komponenten für Telekooperation, VR-Präsentation, Simulation und Anbindung von CAD-Systemen. Die Projektergebnisse werden im Kontext des Virtuellen Maschinenraums in zwei Anwendungsszenarien evaluiert und verdeutlichen das Potential des integrativen Ansatzes zur Unterstützung durchgängiger Prozessketten.

Keywords

Virtual Engineering, Virtuelle Realität, Schiffbau, Integration

1 Einführung

Der Schiffbau ist aufgrund der Verknüpfung zahlreicher industrieller Hightech-Branchen eine Systemindustrie. Die engen Verbindungen zwischen Werften, Zulieferern und Dienstleistern spielen insbesondere bei der Entwicklung von technologischen Systemlösungen eine essentielle Rolle.

Gegenwärtig werden bis zu 70 Prozent der gesamten Wertschöpfung im Schiffbau von einer großen Anzahl von Zulieferern erbracht. Zukünftig wird die Wettbewerbsfähigkeit der Schiffbauindustrie stärker davon abhängen, wie gut die sehr komplexen technischen und wirtschaftlichen Wechselbeziehungen zwischen Werften, Zulieferern und Dienstleistern beherrscht werden. Eine parallele, iterative Arbeitsweise mit kurzen Entwicklungszeiten ist Stand der Technik. Um diese Arbeitsweise effektiv zu gestalten und funktionierende Kooperationsnetzwerke zu schaffen, ist es erforderlich, den kooperierenden Partnern benötigte Informationen möglichst frühzeitig, korrekt und umfassend zur Verfügung zu stellen.

Im Vergleich zur Automobilindustrie ist der Schiffbau gekennzeichnet durch Klein- bzw. Kleinstserien bis hin zu Unikaten. Gerade im Spezialschiffbau, wo der europäische Schiffbau

gegenüber den Wettbewerbern aus Asien durch den hohen technologischen Standard und die Innovationskraft im Vorteil ist, gilt es unter hohem Termindruck mit einer Vielzahl von Partnern ein neues innovatives Produkt zu entwerfen und ohne Prototypen bzw. Null-Serie in hoher Qualität zu fertigen.

Die Technologien des Virtual Engineering können hier einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion der Durchlaufzeiten und zur Steigerung der Qualität leisten. Die Beherrschung der Technologien sowie deren Optimierung unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen des Schiffbaus stellen somit einen wesentlichen Wettbewerbsfaktor dar. Diese These liegt auch dem Projekt „InViS – Integrierter Virtueller Schiffbau" zugrunde, das vom BMBF unter Förderkennzeichen 03SX119x gefördert und vom Projektträger FZ Jülich betreut wird. In einem Konsortium von Werften (Aker Ostsee an den Standorten Wimar und Rostock-Warnemünde), Engineeringdienstleister (Meerestechnik Engineering in Wismar), einem Software- und Systemhaus (Scheller Systemtechnik in Wismar) sowie zwei Forschungsinstituten (Zentrum für Graphische Datenverarbeitung in Rostock und Fraunhofer IPK in Berlin) werden die Integrationsaspekte in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Erst wenn es gelingt, die Technologien nicht nur isoliert anzuwenden, sondern möglichst viele wertschöpfende Prozessketten durchgängig mit diesen Technologien zu unterstützen, können signifikante Impulse für die Werften und ihre Partner erwartet werden.

Mit seinem integrativen Ansatz greift das Projekt zahlreiche Forschungsergebnisse auf, die in verschiedenen Teilgebieten erzielt wurden:

- Leitprojekt „Integrierte Virtuelle Produktentstehung" iViP [KTA02]
- Entwicklung kostengünstiger VR-Systeme für den Schiffbau im Projekt EVRES [GB00]
- Einsatz von schiffbaulichen STEP-APs sowie Erstellung eines Informations- und Kommunikationssystems zur Unterstützung verteilten Arbeitens an Schiffsneubauprojekten in den Projekten INKOFS [BG99] und ISE [BR02], [BB+03]
- Nutzung von Simulation in frühen Phasen des Schiffsentwurfs im Projekt WIPS [WIPS04]
- Einsatz von STEP und XML für den unternehmensübergreifenden Zugriff auf Produktdaten in den Projekten PDTnet [Sac01] und PDM-Collaborator [Hay03]

2 Grundlegende Konzepte

2.1 Datenmodell

Ein wesentlicher Faktor zur Umsetzung von Virtual Engineering ist die Verfügbarkeit eines Produktdatenmodells, das die durchgängige und integrative Gestaltung der Prozesse der Produktentstehung und der hierbei eingesetzten informationstechnischen Werkzeuge ermöglicht.

In InViS wurde aus diesem Grunde ein Produktdatenmodell, das InViS-Schema, basierend auf dem STEP-Standard und den in Abschnitt 1 genannten Vorarbeiten, entwickelt. Die Motivation bestand dabei in der Ausrichtung des Datenmodells auf den Informationsbedarf der Virtual Engineering Prozesse sowie der Kooperationen zwischen Werften, Zulieferern und Dienstleistern. Der Schwerpunkt liegt auf dem „Virtuellen Maschinenraum". Zu den Informationen gehören neben den Produktdaten auch die durchzuführenden Aktivitäten oder Funktionen, die Projektstruktur, Rollen und Zuständigkeiten der Partner, organisatorische Randbedingungen sowie die zur Umsetzung der Prozesse notwendigen Ressourcen. Die formale Beschreibung sowie die Implementierung des Produktdatenmodells erfolgt in Form eines XML-Schemas. Dadurch wird eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung der Integrationsplattform erreicht.

2.2 Architekturkonzept

Wesentliches Merkmal der Architektur ist die Integrationsplattform, die auf die Bedürfnisse des Schiffbaus ausgerichtet ist und die hier verbreiteten unternehmensübergreifenden Kooperationen weitgehend unterstützt. InViS verfolgt einen offenen Ansatz, bei dem Werkzeuge bzw. Komponenten über einheitliche Schnittstellen miteinander gekoppelt werden können. Konkrete Anwendungsfälle lassen sich jeweils über eine Kombination von Werkzeugen und Diensten zur Datenbereitstellung unterstützen. Der Zugang zu der Integrationsplattform für den Konstrukteur erfolgt über den ShipNavigator, der die Funktion eines Clients besitzt. Über die so genannten InViS-Connectoren lassen sich die im Rahmen des Verbundprojekts entwickelten bzw. an die Erfordernisse des Schiffbaus angepassten Werkzeuge wie die für Telekooperation, Virtuelle Realität und Simulation an die InViS-Integrationsplattform anbinden (siehe Abb. 1). Die Connectoren setzen das im Projekt definierte Produktdatenmodell, das InViS-Schema, in das native Datenformat und die zugehörigen Programmierschnittstellen der „Altsysteme" um. Das Enterprise Information Portal (EIP) ist für die Zusammenführung von Daten im Unternehmen bzw. Unternehmensverbund verantwortlich. Gegenüber herkömmlichen Portalen lassen sich die Informationen jedoch nicht nur zentral in einer Oberfläche zusammenführen, sondern stehen auch zur Weiterverarbeitung für verschiedenste IT-Bausteine zur Verfügung. Die Anbindung der in Schiffbau eingesetzten informationstechnischen Systeme geschieht über das EIP. Diese sind beispielsweise CAD-Systeme wie Tribon und Medusa, Projektmanagement- und ERP-Systeme oder Produktdatenmanagementsysteme.

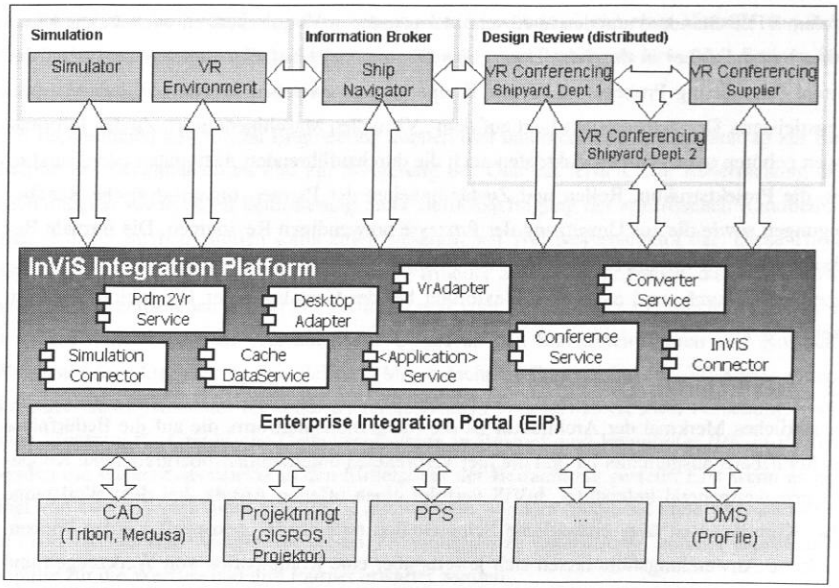


Abb. 1: InViS-Architekturkonzept

3 Komponenten

3.1 ShipNavigator

Der „ShipNavigator" wirkt als „Information Broker" und stellt die gemeinsame einheitliche Oberfläche zur Integrationsplattform dar. Er ist mit umfangreicher Funktionalität ausgestattet und setzt über den InViS-Connector und das neutrale InViS-Datenmodell auf der Integrationsplattform auf. Über diesen neutralen Client kann der Anwender die benötigten Informationen auffinden, Produktstrukturen traversieren, Geometrien darstellen, Konstruktionsfortschritte visualisieren oder Tele- sowie VR-Konferenzen initiieren. Der ShipNavigator realisiert ein Sichtenkonzept, welches das Schiff über eine Raum-, System-, Organisations- oder reine Teilesicht strukturiert und so das Auffinden eines bestimmten Teils oder Dokuments auch für Außenstehende, z.B. Zulieferer, vereinfacht (siehe Abb. 2). Der ShipNavigator besitzt eine Preview-Funktionalität, d.h. Geometriedaten innerhalb der Produktstruktur können in einer Vorab-Sicht angeschaut werden, ohne dass ein komplexes 3D-Visualisierungsprogramm verwendet werden muss. Nach Auswahl des relevanten Datenumfangs kann über den ShipNavigator eine Konferenzschaltung initiiert werden, bei der zwei oder mehr VR-Umgebungen an verschiedenen Standorten verbunden sind. Alle lokalen Aktionen werden sofort an die ange-

schlossenen Teilnehmer verschickt und dort ebenfalls ausgeführt. Mit solchen Telekooperationslösungen können Abstimmungsprozesse in effizienter Weise auch standortübergreifend erfolgen.

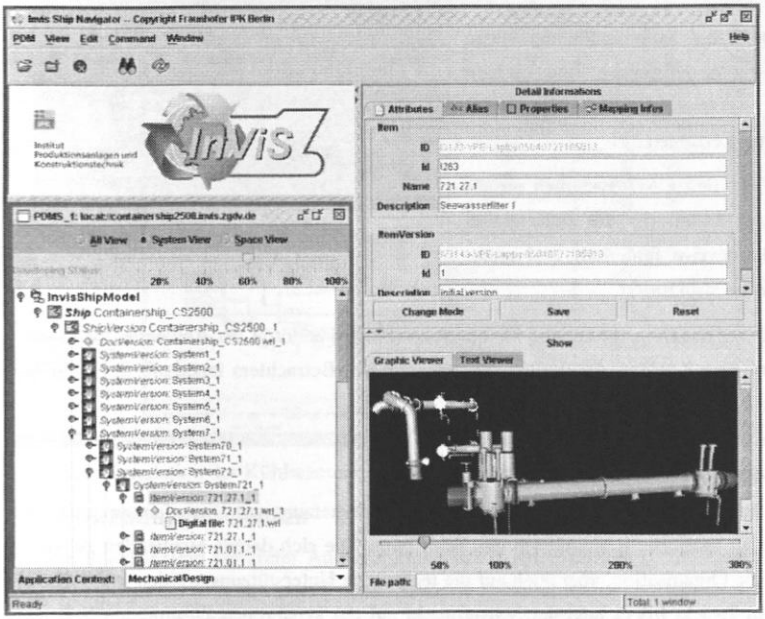


Abb. 2: Oberfläche des ShipNavigators

3.2 Virtual Reality

An der Schnittstelle zwischen dem Virtuellen Produkt als rechnerinterne Repräsentation des Schiffs und dem Mitarbeiter, der diese Daten erzeugt, verändert oder bewertet, spielt die Virtuelle Realität eine wichtige Rolle. Unter Nutzung einer stereoskopischen Darstellung, die ein möglichst breites Sichtfeld abdeckt, entsteht der Eindruck des Eintauchens in das Modell (Immersion). Kombiniert mit möglichst intuitiven Interaktionsmöglichkeiten erhält der Nutzer einen sehr einfachen Zugang zu den hochgradig komplexen und umfangreichen Daten. Während die Konstrukteure auf Grund ihrer Ausbildung und Erfahrung auch mit 2D-Zeichnungen den Überblick behalten, erhalten durch den Einsatz von Virtueller Realität auch die Mitarbeiter in der Fertigung, im Einkauf oder der Qualitätssicherung einen direkten Zugang zu den Daten.

Technische Herausforderungen liegen in den folgenden Bereichen:

- Trotz hoher Komplexität der Daten soll die Visualisierung ohne den Einsatz kostspieliger Graphikrechner in Echtzeit erfolgen.
- Die aus den CAD-Systemen ausgeleiteten Daten für die Präsentation sind teilweise fehlerhaft und unzureichend strukturiert.

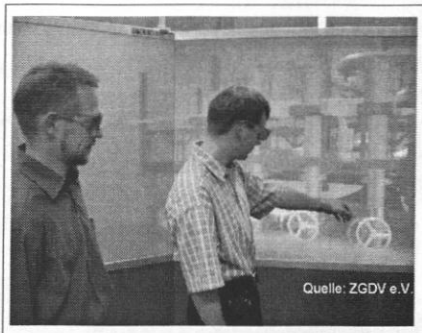


Abb.3: Darstellung des Maschinenraums mittels VR

- Auch bei der Betrachtung von kleinen Ausschnitten benötigt der Anwender stets den räumlichen Kontext, der die aktuelle Position des Betrachters innerhalb des Schiffs wiedergibt.

3.3 Telekooperation

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, ist die enge Vernetzung mit Dienstleistern und Lieferanten ein wesentliches Kennzeichen des Schiffbaus. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Organisation, aber auch auf die technische Unterstützung werden in [GKL03] diskutiert. Im Projekt InViS liegt der Schwerpunkt auf der synchronen Zusammenarbeit von räumlich entfernten Partnern. Im Sinne einer Telekonferenz werden dabei Abstimmungsprozesse unter gemeinsamem Zugriff auf das Virtuelle Produkt unterstützt. Zwei oder mehr Instanzen des VR-fähigen Viewers werden nach dem Verfahren des Application Couplings [Luk03] gekoppelt. Damit lassen sich Konferenzen auch mit schmalbandigen Netzverbindungen effizient unterstützen.

3.4 Simulation

Die intelligente Integration von Modulen für die technisch-wissenschaftliche Simulation ist ein Schlüssel zur effizienten Reduktion der Anzahl der Iterationsschleifen im Schiffsentwurfsprozess. Damit verbunden sind eine Reduzierung der Fehler und späteren Nacharbeiten und damit eine Entwurfsrisikominderung. In InViS ist die exemplarische Entwicklung und Anbindung eines Simulators an das InViS-Framework durchgeführt worden. Zur Anwendung kam aufgrund der Konzentration auf die Maschinenraum spezifischen Anforderungen ein höchst leistungsfähiges Simulationstool für Rohrströmungen, entwickelt und angepasst von MTE. Durch die Integration mit den datenhaltenden Systemen kann die Simulation sehr schnell erstellt werden. Zu einem sehr frühen Zeitpunkt lassen sich so wesentliche Eigenschaften der Konstruktion effizient und zuverlässig absichern.

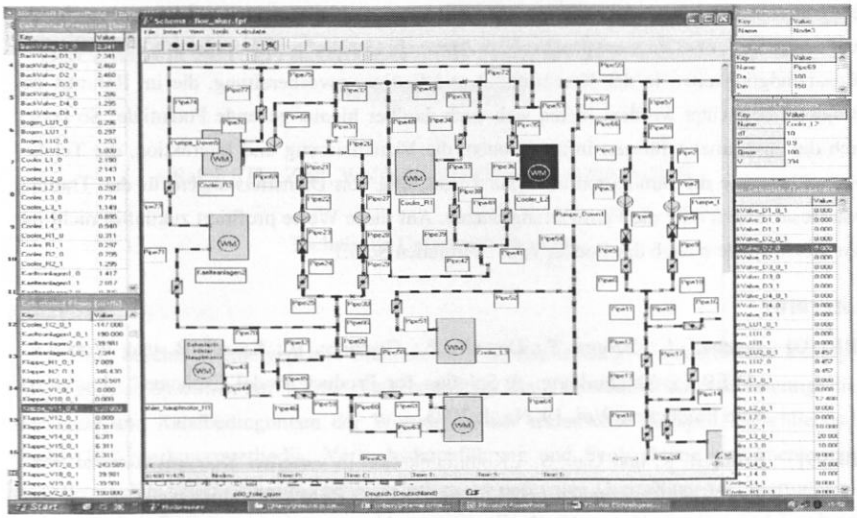


Abb.4: Simulation des Kühlwassersystems in schematischer Darstellung

4 Anwendungsszenarien

Für die Spezifikation konkreter Anforderungen sowie zur Evaluierung der entstandenen Lösungskomponenten wurden verschiedene Szenarien definiert. Diese wurden aus der zu Beginn des Projekts durchgeführten Prozessanalyse abgeleitet und adressieren Bereiche mit hohem Optimierungspotential. Alle Szenarien sind im Engineering des Maschinenraums angesiedelt und decken dort unterschiedliche Schwerpunkte ab. Zwei dieser Szenarien sollen kurz vorgestellt werden. Die **simulationsgestützte Auslegung** des Kühlkreislaufs erfolgt in einer frühen Phase des Entwurfs und erlaubt hier eine wesentlich bessere Absicherung der Lösung gegen die Anforderungen des Kunden. Unter Zugriff auf eine Sammlung von Zulieferteilen, die bereits im CAD-System verfügbar sind, kann eine schnelle Umsetzung der Funktionsskizze in ein ausführbares Modell erfolgen. Beim **verteilten Design-Review** sind zwei oder mehr VR-Umgebungen miteinander gekoppelt. Der Initiator wählt den relevanten Teil der Produktstruktur über den ShipNavigator aus. Dieser Datenumfang wird aus der CAD-spezifischen Darstellung automatisch in das neutrale VRML-Format konvertiert und dann bei den angeschlossenen Teilnehmern in den VR-Viewer übernommen. Im Rahmen der Konferenz kann so beispielsweise eine Überprüfung der Zugänglichkeit oder die Optimierung von Aufstellungsplänen in komplexen Einbausituationen vorgenommen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeiten in InViS haben gezeigt, dass auch bei einer sehr heterogenen Systemumgebung, wie sie innerhalb der Werften und noch extremer im Verbund aus Werften und Zulieferern

gegeben sind, Prozesse durchgängig unterstützt werden können. Das InViS-Schema und der Integrationsansatz unter Verwendung von Web-Services bieten ein hohes Maß an Flexibilität, wie es für die Umsetzung anspruchsvoller Anwendungsfälle auch erforderlich ist. Neben den Einsatzmöglichkeiten in der Konstruktion und Fertigungsvorbereitung, die im Rahmen des Projektes betrachtet wurden, bieten sich auch darüber hinaus gehende Potentiale: So lassen sich die zusammengeführten Informationen, die Visualisierung und Interaktion, die Telekooperation sowie die Simulation auch zur Umsetzung von Dienstleistungen für das Training von Besatzungen oder die Fernwartung nutzen. Auf diese Weise profitiert zukünftig nicht nur die Werft, sondern auch der Reeder vom „Virtuellen Schiff".

Literatur

[BB+03] Benthall, L.; Briggs, T.; Downie, B.; Gischner, B.; Kassel, B. und Wood, R.: „STEP for Shipbuilding: A Solution for Product Model Exchange", Journal of Ship Production, Vol. 19, No. 1, 2003.

[BG99] Bronsart, R. und Gau, S.: „Kommunikation in verteilter Konstruktion und Fertigung – Anforderungen und Lösungsansätze" in Schiffbauforschung 38 (4), Universität Rostock, Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik , 1999.

[BR02] Briggs, T.L. und Rando, T.C.: „XML Schemas for Shipbuilding", 11th ICCAS, Malmoe, September 2002.

[GB00] Günther, N. und Bürger, T.: „EVRES – Using Virtual Reality Technology to Increase Effectiveness in Shipbuilding", Computer Graphik topics, 2/2000, Vol. 12.

[GKL03] Gronau, N.; Kern, E.-M.; von Lukas, U.: „Integration des Community-Gedankens in das Collaborative Engineering am Beispiel des Schiffbaus". In: Uhr, W. et al. (Ed.) Wirtschaftsinformatik 2003. Heidelberg : Physica-Verlag, 2003.

[Hay03] Hayka, H. et al.: Abschlussbericht des Verbundprojekts PDM-Collaborator www.pdm-collaborator.de, 2003.

[KTA02] Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U. (Hrsg,): Abschlussbericht des Leitprojekts „Integrierte Virtuelle Produktentstehung". Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002.

[Luk03] von Lukas, U.: „Modellbildung und Methodik für die integrationsbasierte Telekooperation in der Produktentstehung". Dissertation, Fraunhofer IRB Verlag, 2003.

[Sac01] Sachers, M.: „PDTnet – Produktdatentechnologie im Netzwerk", ProduktDaten Journal, Nr.2, 2001.

[WIPS 04] Homepage BMBF-Projekt WIPS – Wettbewerbsvorteile durch informationstechnisch unterstützte Produktsimulation im Schiffbau, www.wips-d4.org Stand 09.08.2004

Szenarien zur Evaluation von AR- unterstützter Wartungstätigkeit

Ralph STELZER, Wolfgang STEGER, Bernhard SASKE

Technische Universität Dresden

Abstract

Der Beitrag beschreibt eine geplante Untersuchung zur Evaluierung von Augmented Reality- (AR) basierten Systemen zur Wartungsunterstützung. Der Versuchsaufbau berücksichtigt die Merkmale und Randbedingungen der Wartung großer technischer Anlagen. Anschließend werden Untersuchungsmethodik, Versuchsdurchführung und Beobachtungsinstrumentarium beschrieben. Die Untersuchungsergebnisse sollen der optimalen Darstellung von Wartungsinstruktionen in AR- Systemen dienen und konzeptionelle Ansätze zu Navigation und Tracking bestätigen.

Keywords

Augmented Reality (AR), Wartungsunterstützung, Untersuchung

1 Einleitung

Am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD wird ein integriertes System zur Unterstützung von Wartungsprozessen entwickelt. Unter Nutzung von PLM - Informationen können Wartungsunterlagen generiert und in ein Augmented Reality (AR) - System übertragen werden (Augmented Reality: erweiterte Realität). Vor Ort wird der Techniker bei der Wartungstätigkeit von diesem System geleitet und mit Information versorgt (siehe Bild 1). Ausführlicher ist das Konzept in SSS-03 beschrieben.

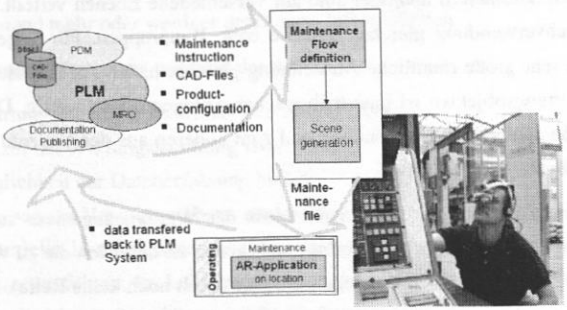


Abb.1: Gesamtkonzept für ein System zur Wartungsunterstützung [SSS-04]

AR- Systeme, wie das am Lehrstuhl vorhandene, bestehen üblicherweise aus einem tragbaren Computer sowie einem Head Mounted Display (HMD) als zentralen Komponenten und eventuell weiteren Ein/Ausgabegeräten (Kamera, Mikrofon, Kopfhörer, ...), siehe Bild 2.

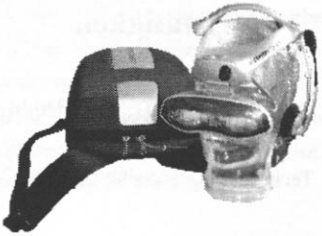


Abb.2: Cybercompanion als typisches AR- System

Betrachtet man den gegenwärtigen Entwicklungstand AR- unterstützter Wartungssysteme, lässt sich erkennen, dass vorwiegend technische bzw. informationstechnische Probleme bearbeitet wurden. Verhältnismäßig wenige Angaben finden sich zur anwendergerechten Gestaltung und effizienten Nutzung, die Voraussetzung für eine stärkere Akzeptanz und Verbreitung dieser Technologie sind. Eine der wenigen Arbeiten zu diesem Thema ist BEU-02.

Dem angesprochenen Thema widmet sich die im vorliegenden Beitrag beschriebene Laboruntersuchung. Mit dieser sollen einige Thesen zu Vorteilen AR – basierter Wartungssysteme bestätigt und Empfehlungen für deren Gestaltung abgeleitet werden. Die Anforderungen an den Versuchsaufbau sowie deren technische Umsetzung werden nachfolgend beschrieben und diskutiert.

2 Das Wartungsumfeld im Versuch

2.1 Navigation im Anlagenkontext

Das zu entwickelnde Wartungsunterstützungssystem soll innerhalb von Chemieanlagen und automatisierten Lagersystemen Verwendung finden. Chemische Anlagen haben Ausdehnungen von mehreren Kilometern und/oder sind auf verschiedene Ebenen verteilt. Hinzu kommt hier die Mehrfachverwendung gleicher Bauteile bzw. Baugruppen. Für Lagersysteme trifft dies, bis auf die sehr große räumliche Ausdehnung gleichermaßen zu. Die Identifikation der Position von Wartungsobjekten ist innerhalb solcher Anlagen oft schwierig. Dies ergibt sich zum einen aus der räumlichen Ausdehnung und zum anderen aus der Vielzahl der verbauten (auch gleichen) Bauteile/Baugruppen.

Zur Durchführung von Wartungshandlungen muss der Wartungsingenieur zunächst seinen unmittelbaren Arbeitsort innerhalb der Anlage aufsuchen, an dem sich die zu wartenden Teile/Baugruppen befinden (die konkrete Arbeitsaufgabe spielt noch keine Rolle). Im Folgenden

wird dieses Aufsuchen bzw. Wechseln des Arbeitsortes als „Navigation im Anlagenkontext" bezeichnet.

Ein Unterstützungssystem muss in diesem Prozess

- die Position des Wartungsingenieurs innerhalb der Anlage ermitteln,
- den nächsten Arbeitsort bestimmen und
- ausgehend von der aktuellen Position den Wartungsingenieur mit einer hinreichenden Genauigkeit (ca. 1m) an den Arbeitsort heranführen.

Zur Nachbildung des Anlagenkontextes im Versuchsraum müssen mehrere Arbeitsorte vorhanden sein. Diese dürfen nicht gleichzeitig einsehbar sein, um Ortswechsel nachbilden zu können. Beim Ortswechsel müssen verschiedene Höhenunterschiede und Hindernisse überwunden werden. Weiterhin sollen unterschiedliche Beleuchtungssituationen nachgebildet werden. Einflüsse wie Lärm, Hitze, Staub etc. werden nicht betrachtet.

Für den konkreten Versuchsaufbau bedeut dies einen hinreichend großen Raum (ca. 6m x 6m). Es werden Wände aus Gipskarton oder Presspanplatten errichtet, welche die Wartungsobjekte aufnehmen. Durch die Gestaltung von Querwänden oder Nischen können verschiedene visuell getrennte Bereiche geschaffen werden. Somit können mehrere Arbeitsorte simuliert werden, zu denen eine Versuchsperson mittels Instruktionen geführt werden muss.

2.2 Tätigkeiten im Arbeitsraum

Nach dem Erreichen der Position zur Wartung eines Bauteils/Baugruppe ändert sich die Aufgabe des Wartungsingenieurs. Er befindet sich jetzt unmittelbar am zu wartenden Objekt. Der Raum um das zu wartenden Objekt herum wird als Arbeitsraum bezeichnet. In diesem werden

- Teile/Baugruppen montiert/demontiert,
- Einstellungen vorgenommen und
- Messungen/Überprüfungen durchgeführt.

Bei allen durchzuführenden Tätigkeiten ist die sichere Identifikation relevanter Bauteile zu gewährleisten. Des Weiteren benötigt der Wartungsingenieur abhängig von seinem Erfahrungs-/Wissensstand mehr oder weniger detaillierte Informationen.

Das Unterstützungssystem muss während der Arbeit:

- dem Wartungsingenieur Informationen bereitstellen,
- den Ablauf der Wartungshandlung steuern und
- die Möglichkeit der Datenerfassung bieten.

Innerhalb des gesamten Versuchsaufbaus sind verschiedene Stationen vorgesehen. An diesen sind jeweils spezielle Handlungssequenzen wie Schaltvorgänge, öffnen von Abdeckungen, Prüfschritte etc. auszuführen. Im Laborversuch werden innerhalb mehrerer Arbeitsräume folgende Wartungssituationen (bezeichnet mit S1 bis S4) realisiert:

- S1: Prüfen und einstellen eines mechanischen Spiels (Einstellschraube mit Kontermutter),
- S2: elektrische Spannungen messen und protokollieren (Schaltschrank),
- S3: Manipulationen innerhalb einer Menge kleiner Bauteile (Brücke, Dipschalter auf Leiterplatten),
- S4: Wechsel eines Bauteils innerhalb einer Menge gleicher/ähnlicher Teile (Anordnung mehrerer Näherungssensoren aus Transportsystem).

3 Untersuchungsplanung

3.1 Thesen

Angenommen wird, dass mit einem AR- unterstützten System die Wartung komplexer Anlagen besser durchgeführt werden kann. Im Einzelnen werden folgende Thesen aufgestellt:

These 1:Die Navigation im Anlagenkontext ist mit AR- Unterstützung schneller als mit konventioneller Dokumentation.

Es wird davon ausgegangen, dass ein Wartungsunterstützungssystem schneller die richtigen Informationen zur Navigation im Anlagenkontext bereitstellen kann. Zur Überprüfung der These wird die Zeit gemessen, welche die Versuchsperson zum Aufsuchen von mehreren Arbeitsorten benötigt. Verglichen werden Versuchspersonen die mit konventioneller Dokumentation bzw. mit AR- System geführt werden.

These 2: Im Arbeitsraum ist kein Tracking nötig.

AR- Systeme ergänzen die reale Geometrie mit zusätzlichen computergenerierten Informationen. Um diese Informationen mit der richtigen Skalierung und Positionierung in das Sichtfeld des Wartungsingenieurs einzublenden werden üblicherweise Trackingsysteme verwendet. Daraus resultieren jedoch einige Probleme. Verfügbare Trackingsysteme sind zu ungenau oder unter den gegebenen Bedingungen nicht einsetzbar. Zusätzlich ist der Sitz von HMDs auf dem Kopf nicht ausreichend genau reproduzierbar. Damit befinden sich eingeblendete Informationen niemals an der korrekten Position (vgl. HÖF-04). Aus diesem Grund verzichtet das Konzept auf Tracking im Arbeitsraum und setzt auf die Adaptionsfähigkeit des Menschen (vgl. SSS-04). Der Wartungsingenieur stellt selbst die Überlagerung von virtueller Information und realem Objekt her, indem er für eine vom AR- System vorgegebene Skalierung Betrachtungsabstand und Blickrichtung optimiert.

Zur Untermauerung dieser These werden die Situationen S3 und S4 herangezogen, bei denen die Identifikation von Teilen gefordert ist. Da eine echte Vergleichsgruppe fehlt, kann nur überprüft werden, ob Teile in komplizierten Anordnungen bzw. sehr kleine Teile sicher erkannt werden können.

These 3:Bei Tätigkeiten im Arbeitsraum verringert ein AR- System Fehlerzahl und Zeitaufwand gegenüber Wartungsarbeit nach konventioneller Dokumentation. Dieser Effekt ist bei kompliziertem Identifikationsproblem stärker.

Durch die Einblendung von Instruktionen in das Sichtfeld des Ingenieurs bleibt der Blick im Arbeitsraum. Ein einmal identifiziertes Wartungsobjekt befindet sich dadurch ständig im Aufmerksamkeitsfokus des Ingenieurs. Ein wiederholtes Identifizieren desselben Objektes entfällt, da der Ingenieur nicht den Blick ständig zwischen realem Objekt und Abbildung bzw. Dokumentation wechseln muss. Im Versuch werden Fehler und Zeiten beim Ausführen von Identifikationsvorgängen und nachfolgenden Wartungshandlungen erfasst. Die Versuchspersonen arbeiten dabei mit AR- System oder herkömmlicher Dokumentation.

Gleichfalls untersucht wird, ob der erwartete Effekt stärker ausgeprägt ist, wenn zunehmend komplexe Tätigkeiten mit höherem Informationsbedarf und höherer Schwierigkeit ausgeführt werden müssen.

These 4: Die psychische und physische Arbeitsbelastung ist bei Verwendung eines AR- Systems höher als bei konventioneller Dokumentation.

Die Durchmischung von Realität und Virtualität steht mit der sonstigen Wahrnehmungserfahrung des Menschen im Widerspruch und wird zu einer höheren psychischen Belastung führen.

Weiterhin ist durch das HMD und den PC eine gewisses Gewichtsbelastung zu ertragen und eine wenn auch geringe Beeinträchtigung der Beweglichkeit zu erwarten.

In welchem Maß diese Faktoren die empfundene Belastungssituation und das subjektive Erleben der Tätigkeit der Versuchspersonen beeinflussen, kann im Rahmen des geplanten Vorhabens aus entsprechenden Befragungen eruiert werden.

Wie die Untersuchungsthesen verdeutlichen, wird angenommen, dass mit einem AR System eine qualitativ hochwertigere Wartung in kürzerer Zeit zu realisieren ist. Insgesamt erbringt die geplante Untersuchung des Einsatzes eines AR- Systems damit Aussagen zur Effizienz und Belastung.

3.2 Methodik

Untersuchungsdesign

Die Untersuchung soll bezüglich der aufgestellten Thesen Trendaussagen erlauben und einen Vergleich mit herkömmlicher Wartungsdurchführung zulassen. Insofern ist sie als Fallstudie aufzufassen, die keine statistisch abgesicherten Ergebnisse liefern wird. Dies gilt um so mehr, als zu erwarten ist, das im Verlauf der Untersuchung Modifikationen am Versuchsaufbau, am verwendeten AR- System und an der eingesetzten Versuchsinstruktion vorgenommen werden.

Die Anzahl der Versuchspersonen soll bei etwa 20 liegen. Diese werden in Gruppen aufgeteilt. Alle Probanden durchlaufen den gleichen Versuch, erhalten ihre Instruktionen jedoch

gruppenabhängig entweder durch das AR- System oder durch eine konventionelle, per Notebook- PC bereitgestellte, Dokumentation/Anleitung aus Text und Bild.

Untersuchungsablauf

In einer Vorbefragung werden bei jedem Teilnehmer Erfahrungen im Umgang mit Computern und AR- Systemen erhoben. Weiterhin werden das maschinenbauliche Wissen und praktische Fähigkeiten der Teilnehmer grob erfragt.

Vor der Untersuchung wird der Teilnehmer in die Benutzung des AR – Systems eingewiesen. Zum Testen erhält er die Möglichkeit, sich einige Minuten mit der Hardware und der Bedienung des CyberCompanion auseinander zu setzen.

Anschließend erhalten die Probanden die Datei bzw. Dokumente mit den abzuarbeitenden Wartungsaufgaben und beginnen den Versuch. Grundsätzlich ist jede Versuchsperson auf sich gestellt und soll die Aufgabe autark, lediglich mit der vorgesehenen Unterstützung durch das AR- System bzw. die Dokumentation erfüllen. Der Umfang der auszuführenden Arbeiten wird so bemessen, dass diese in 15 bis 20 Minuten erledigt werden.

Nach werden der Versuchspersonen erneut befragt, um subjektive Eindrücke zur Systemgestaltung und die erfahrene Belastungssituation zu erfassen.

Gleichfalls nach Abschluss der Wartungsaufgabe müssen die erledigten Arbeiten überprüft und eventuelle Fehler registriert werden.

Beobachtungsinstrumentarium

Die Beobachtungsmethoden sollen den Probanden weitgehend unbeeinflusst agieren lassen.

Neben den erwähnten Befragungen der Versuchspersonen ist eine statische Videoaufzeichnung des kompletten Versuchsstandes vorgesehen. An Hand dieser kann das Vorgehen der Versuchspersonen in Teiltätigkeiten gegliedert werden.

Dadurch können die Zeitaufwände für

- Aufgabenerfassung
- Navigation im Anlagenkontext
- Tätigkeit im Arbeitsraum

erfasst werden.

Parallel dazu wird in einem Logfile die Interaktion des Probanden mit dem AR- System bzw. der Wartungsdokumentation aufgezeichnet.

Durch die Synchronisation von Video und Logfile kann nachträglich das Arbeiten der Versuchspersonen mit den bereitgestellten Informationen ausgewertet werden. Dabei interessiert, wie navigiert wurde, wann welche Informationen angezeigt wurden.

4 Bewertung der Untersuchung

Die Untersuchung soll unmittelbar Richtungsentscheidungen für die Gestaltung der Visualisierungskomponente im eingesetzten AR- System ermöglichen. Es sollen beispielsweise rein monochrome Anzeigen mit Farbdarstellung sowie Variationen bei der Gestaltung von Menüs verglichen werden. Ferner können verschieden Kombinationen von Text, Grafik und akustischen Informationen getestet werden, um das Userinterface des AR- Systems zu optimieren.

Ein weiteres wesentliches Ziel der Untersuchung ist die Überprüfung der konzeptionellen Entscheidung, auf Tracking während der Wartungshandlung (Tätigkeit am Arbeitsort) zu verzichten.

Weiterhin sind tendenzielle Aussagen zu temporären oder qualitativen Effekten sowie psychischen und physischen Auswirkungen AR- unterstützter Servicetätigkeit zu gewinnen.

5 Literatur

[APP-03] Appel, M.: Augmented Reality für innovative Service- und Engineering- Lösungen im Kraftwerksbereich, in: 3. ARVIKA–Forum, Nürnberg, 2003

[BEU-02] Beu, A.: Usability für Augmented Reality Systeme in Entwicklung, Produktion und Service, MIT Workshop: Usability für Augmented Reality Systeme in Entwicklung, Produktion und Service 25.02.2002 http://www2.dlr.de/PT-DLR/sw/workshop05/beu.pdf

[HÖF-04] Höfgen, M.: Entwicklung eines Kalibriermoduls zur lagerichtigen Überlagerung eines realen Bauteils mit seinem virtuellen Modell, Großer Beleg, TU Dresden, 2004

[SSS-03] Stelzer, R.; Steger, W.; Saske, B.: Effiziente Wartung komplexer Systeme mittels Augmented Reality, in: 1. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik Shaker, 2003

[SSS-04] Stelzer, R.; Steger, W.; Saske, B.: Efficient maintenance of complex machine systems based on Augmented Reality as part of the Product Lifecycle Management, in: CIRP 2004, Kairo, 2004

Produktentwicklung mit Rapid Prototyping

Wolfram STOLP

Fachhochschule Südwestfalen, Abt. Meschede

Abstract

Der Einsatz innovativer Methoden führt zu Zeit- und Kostenvorteilen und damit zum Markterfolg. Die konsequente Anwendung des Rapid Prototyping ist eine Methode, schnell und unkompliziert Prototypen und Modelle mit Hilfe der durchgängigen Nutzung der C-Techniken bereits in der Planungsphase zu fertigen. Idealerweise sollten bereits diese Prototypen sämtliche Eigenschaften des späteren Produktes aufweisen.

Grundlage der Erzeugung physikalischer Prototypen sind die dreidimensionalen CAD-Daten, die für die Nachfolgeprozesse übernommen und aufgearbeitet werden.

Keywords

Produktentwicklung, Rapid Prototyping, Stereolithographie, Selektives Lasersintern, Fused Deposition Modeling.

1 Neue Anforderungen – neue Verfahren

Aufgrund der Marktsituation sind Unternehmen gezwungen, in immer kürzerer Zeit komplexere Produkte zu entwickeln. Neben der Komplexität stieg parallel hierzu die Variantenanzahl aufgrund der Kundenanforderungen nach individuellen Produkten. In dieser Situation sehen sich Unternehmen mit immer kürzeren Produktlebenszyklen und Produktentwicklungszeiten konfrontiert. Diese Marktbedingungen zwingen Unternehmen zur Einführung innovativer Technologien des Rapid Prototyping.

Auf Grund der einfachen Grundidee, Produkte bzw. Modelle schichtweise aufzubauen, konnte man den Anforderungen des Marktes gerecht werden, schnell, einfach und unabhängig von der Komplexität physische Modelle herzustellen. Mit der Technologie des Rapid Prototypings steht Unternehmen ein Hilfsmittel zur schnellen Herstellung von diversen Modellen und damit zur Optimierung der gesamten Produktentwicklung zur Verfügung.

1. Geometrieprototypen
=> Beurteilung von Maß, Form und Lage
Materialeigenschaften noch unwichtig

2. Funktionsprototypen
=> Erfüllen einige Produkteigenschaften
Überprüfung von Funktionalitäten

3. Technische Prototypen (Rapid Tooling)
=> Erfüllen fast alle Eigenschaften
des Serienproduktes

Abb. 1: Herstellung unterschiedlicher Prototypen

2 Produktentwicklung

Kritische Einflussgrößen sind Zeit und Kosten, die sich zur einer Zielgröße zusammenfassen lassen. Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst eine 50%-ige Steigerung der Entwicklungskosten lediglich zu einer Verschlechterung des durch die Vermarktung eines Produktes erzielten Ergebnisses von nur 5% führt, wenn auf diese Weise eine um 6 Monate vorverlegte Markteinführung realisiert werden kann. Andererseits kann eine gerade um diesen Zeitraum verspätete Markteinführung eines Produktes zu Ergebniseinbußen in der Größenordnung von ca. 30% führen. Durch eine frühere Markteinführung eines Produktes lassen sich Vorteile gegenüber der Konkurrenz erzielen, deren Auswirkungen auch noch nach dem Gleichziehen eines Wettbewerbers spürbar sind. Neben der Nutzung einer zeitlichen begrenzten Monopolstellung verschafft sich das jeweils erste Unternehmen am Markt einen Erfahrungsvorsprung, der im Laufe des Produktlebenszyklus oft nur schwer von den Wettbewerbern ausgeglichen werden kann. Darüber hinaus lässt sich beobachteten, dass bei der Einführung neuer Technologien oft der Erstanbieter mit seinen Technik einen de facto -Standard setzt, der ihm über einen langen Zeitraum einen Vorsprung bei der Entwicklung von Folgeprodukten gewährt.

3 Bedeutung der Modelle im Unternehmen

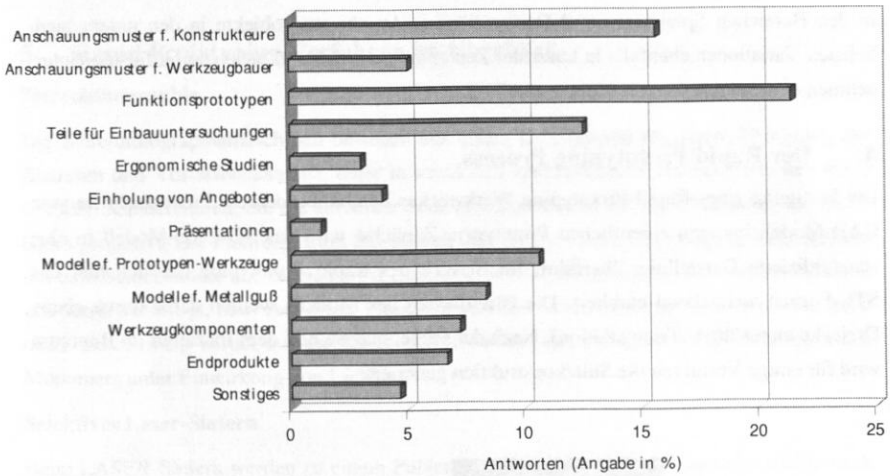


Abb. 2: Einsatzgebiete für RP-Modelle *Quelle: Wohlers, T.: Weltweite Branchenübersicht 2004 Rapid Prototyping & Rapid Tooling

Im Vergleich zu Zeichnungen und CAD-Darstellungen besitzen physische Modelle viele Vorteile, die eine sichere Überprüfung des Produktentwurfes erlauben.

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses sind Modelle nicht nur als Anschauungsmodelle zur reinen Überprüfung der Geometrie erforderlich. Gerade zu Beginn der Produktentwicklung können sie als Kommunikationsmodelle einen wichtigen Beitrag zur Validierung des Entwurfes liefern. Außerhalb des Unternehmens werden Kommunikationsmodelle zur Unterstützung des Vertriebs und des Marketings eingesetzt. Sie erleichtern darüber hinaus auch die Zusammenarbeit mit Lieferanten. Im Rahmen der Auftragsakquisition ist die Werbewirkung eines Modells gegenüber einer ebenen Darstellung am Bildschirm oder einer Zeichnung deutlich höher.

Die Einsatzgebiete sind sehr vielfältig und finden sich neben dem Automobilbau, Flugzeugbau, Werkzeugmaschinenbau, sowie in den Bereichen der Industrie für Haushaltsgeräte und Heimwerkerartikel. Für die Medizintechnik bietet sich mit dem Rapid Prototyping die Möglichkeit, anhand von 3D-Daten aus Kernspintomographen z.B. Knochenteile im Original nachzubilden. Diese Modelle sind neben dem Einsatz zur Diagnostik auch für die Operationsvorbereitung geeignet.

In den Bereichen Spielwaren und Design können Anschauungsobjekte in den unterschiedlichsten Variationen ebenfalls in kürzester Zeit erstellt werden und bieten somit für die Unternehmen eine bessere Entscheidungsgrundlage.

4 Der Rapid Prototyping Prozess

Die Fertigung eines Rapid Prototyping Werkstückes beinhaltet mehrere Prozessschritte vom CAD-Modell bis zum eigentlichen Prototypen. Zunächst wird das 3D-CAD-Modell in eine standardisierte Darstellung überführt. Im Bereich des Rapid Prototyping hat sich hier das STL-Format weitgehend etabliert. Die Oberflächen des Modells werden dabei durch ebene Dreiecke angenähert (Triangulation). Nach der Fehleranalyse und dem Plazieren im Bauraum wird für einige Verfahren die Stützkonstruktion generiert.

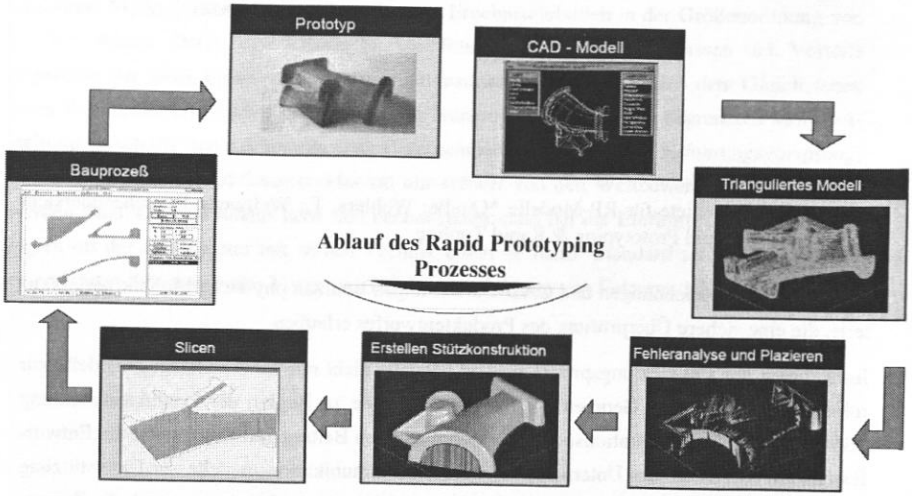


Abb. 3: Ablauf des Rapid Prototyping Prozesses

Das facettierte Volumenmodell wird während des anschließenden "Slice"-Vorganges in Schichtdaten konvertiert. In einer Datei werden die Konturen jeder Schicht in Form von Polygonzügen mit der zugehörigen Schichtdicke abgespeichert. Bevor der Bauprozess beginnen kann, müssen den Schichtdaten verschiedene Prozessparameter wie beispielsweise die Laserleistung, Belichtungsgeschwindigkeit oder Vorschübe zugewiesen werden. Der Bauprozess läuft schließlich vollkommen automatisch ab.

5 Rapid Prototyping Verfahren im Überblick

Stereolithographie

Die Stereolithographiemaschinen bestehen aus einem Behälter mit flüssigem Monomer, der Bauraum und Vorratsbehälter ist, einer in vertikalen verschiebbaren Bauplattform und einer LASER-Scannereinheit, die die aktuellen Schichtinformationen auf die Oberfläche des Harzbades projiziert. Die Plattform trägt das Modell und senkt es nach Verfestigung einer Schicht um eine Schichtstärke ab. Danach wird eine neue Schicht aufgetragen, diese erneut belichtet und somit verfestigt, usw. Auf diese Weise entsteht das Modell schichtweise von unten nach oben. Das Prinzip beruht auf die Photopolymerisation, das heißt das lokale Aushärten des Monomers unter Einwirkung von Licht.

Selektives Laser-Sintern

Beim LASER-Sintern werden zu einem Pulverbett dicht nebeneinander gepackte und je nach Prozess leicht vorverdichtete Körnchen mit Hilfe eines LASER-Strahls örtlich leicht an- oder aufgeschmolzen, erstarren durch Abkühlung infolge Wärmeleitung und verbinden sich so zu einer festen Schicht. Durch Absenken dieser Schicht und erneutes beschichten mit Pulver wird in Analogie zur ersten die zweite Schicht verfestigt und mit der ersten verbunden. Als Werkstoffe kommen dabei Thermoplaste wie z.B. PS, PA, PC zum Einsatz, sowie Metalle (Stahl/Kupfer, Bronze/Nickel), aber auch Croningsand.

Schicht-Laminat-Verfahren

Schicht-Laminat-Verfahren oder „Layer Laminate Manufacturing" (LLM) werden häufig als Laminated Object Manufacturing (LOM) bezeichnet.

Der LLM Prozess stellt die direkte Umsetzung der Theorie der Schichtverfahren durch eine Maschine dar. Dabei schneidet ein CO_2-LASER oder ein spanendes Werkzeug die Kontur entsprechend den jeweiligen Schichtinformationen aus. Es handelt sich hierbei genau genommen um ein abtragendes (ausschneidendes) und aufbauendes Verfahren. Verwendet wird entweder ein mit Polyethylenklebstoff kaschiertes Schichtmaterial, oder der Klebstoff wird im Zuge der Schichtgenerierung aufgetragen. Das 3D-Modell entsteht in z-Richtung durch das Fügen (verkleben) aufeinander folgender Schichten

Extrusions-Verfahren

Bei dieser Art der Modellierung durch Schmelzauftrag oder „Fused Deposition Modeling" (FDM) wird ein drahtförmiger thermoplastischer Kunststoff in einer beheizten Düse aufgeschmolzen und definiert auf ein Bauteil abgesetzt. Die Schichtbildung erfolgt durch Erstarrung aufgrund Wärmeleitung. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der breiten Werkstoffpalette und den unterschiedlichen Farben, die in den verschiedenen Stufen des Produktentstehungsprozesses sinnvoll eingesetzt werden können. Das Verfahren benötigt Stützen, die in einem Bad heraus gewaschen werden können. Die Maschinen sind für die Büroumgebung am Konstruktionsarbeitsplatz geeignet.

6 Potentiale der Technologie Rapid Prototyping

Durch den Einsatz der Rapid Prototyping-Technologie können vor allem die Modellherstellkosten und –herstellzeiten deutlich reduziert werden. Gegenüber dem konventionellen Modellbau sind Einsparungen von bis zu 70 % realisierbar. Durch die schnelle Verfügbarkeit physikalischer Modelle in den unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung können kurze Iterationsschleifen in der Entwicklung durchgeführt werden. Aufgrund der somit früher erkannten Mängel wird die Produktentwicklungsqualität stark verbessert. Weiterhin ist mit Hilfe dieser Modelle eine frühere Integration in den Produktentwicklungsprozess von unterschiedlichen Abteilungen oder externen Zulieferern möglich. Ein Simultaneous Engineering wird somit mit der Technologie Rapid Prototyping wesentlich unterstützt. Zuletzt können die oben genannten Änderungen aufgrund des frühen Zeitpunkts der Produktentwicklung kostenneutral in den Werkzeugbau einfließen.

Rapid Prototyping Systeme werden zurzeit international weiterentwickelt. Die Systeme für seriennahe Kunststoffprototypen sind in vielfältiger Ausführung am Markt vertreten. Ziel für die nahe Zukunft sind Systeme, die direkt seriennahe Metallprototypen herstellen können.

Das unternehmensindividuelle Produktdatenmodell als Voraussetzung einer erfolgreichen PDMS-Einführung – ein Erfahrungsbericht

Jörg FELDHUSEN, Boris GEBHARDT, Erwin-Zahari NURCAHYA, Nils MACKE

RWTH Aachen

Keywords

Produktdatenmodell, PDMS-Einführung, Prozessanalyse, Daten- und Informationsfluss, IT-Landschaft

1 Einleitung

Im Rahmen unterschiedlicher Initiativen auf politischer und industrieller Ebene sowie durch den Zwang bezüglich immer kürzer werdender Produktlebenszyklen am Markt erwägen immer mehr kleine und mittelständische Unternehmen (KMU's) zur Steigerung ihrer Arbeitseffizienz und zur Verkürzung der Durchlaufzeit ihrer Geschäftsprozesse die Einführung eines Produktdaten-Management-Systems (PDMS) [3; 6; 9].

Viele dieser Einführungen scheitern nicht zuletzt deshalb, weil die KMU's vielfach falsche Erwartungen und ungenaue Vorstellungen hinsichtlich des Einsatzzwecks eines PDMS innerhalb ihres Unternehmens haben [6; 10]. Auch die ungenügend vorbereitete Einführung eines derartigen Systems trägt dazu bei, dass viele Ressourcen ohne entsprechende Ergebnisse verschwendet werden, obwohl bereits entsprechende Veröffentlichungen vorliegen [3; 9; 11].

Demzufolge ist ein strukturiertes und vorbereitendes Vorgehen zwingend erforderlich, um den Erfolg nicht nur während der Einführungsphase, sondern auch darüber hinaus für die gesamte anschließende Nutzungsphase des Systems zu gewährleisten. Dieses Vorgehen muss vor allem die spezifische Situation des Unternehmens am Markt und seiner Produkte von Beginn an konsequent berücksichtigen, bevor überhaupt ein PDMS ausgewählt werden kann [7]. Dazu muss ein solches Vorgehen nicht nur den individuellen „Charakter" des KMU's, sondern auch die spezifischen Informations- und Datenflüsse sowie die zumeist historisch gewachsenen Prozessabläufe mit den dazugehörigen Daten berücksichtigen [9]. Das Ergebnis ist (neben einem Prozessmodell) ein möglichst vollständiges Produktdatenmodell, welches die genannten Forderungen in sich vereint [3; 8].

Inhalt dieses Papers ist die methodische Vorgehensweise bei der Vorbereitung einer PDMS-Einführung in einem mittelständischen Unternehmen; der Schwerpunkt liegt auf der

Erstellung eines unternehmensindividuellen Produktdatenmodells. Dazu wurde zunächst eine Voruntersuchung durchgeführt, um die Ist-Situation zu analysieren und dadurch fehlende Voraussetzungen zu identifizieren.

2 Ablauf der Voruntersuchung

In der Voruntersuchung wurden sowohl die tatsächlichen Bedürfnisse und Ziele des Unternehmens ermittelt als auch eine umfassende Bestandsaufnahme der Voraussetzungen für eine PDMS-Einführung innerhalb des Unternehmens durchgeführt. Besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der Beantwortung von Fragestellungen betreffend einer PDMS-Eignung hinsichtlich verwendbarer IT-Strukturen, vorhandener Prozessdefinitionen, der zugehörigen Datenflüsse und deren modellhafte Aufbereitung.

Um diese Voraussetzungen zu klären und somit eine Grundlage für die Erstellung des Produktdatenmodells zu schaffen, wurde die nachfolgende Vorgehensweise gewählt, die sich zum Teil auch in der einschlägigen Literatur wieder findet:

- die IST-Analyse der vorhandenen IT-Landschaft [3; 6; 7; 9],
- die IST-Analyse der ablaufenden Geschäftsprozesse im Bereich „Entwicklung und Konstruktion" [1; 9],
- die Identifizierung des eigentlichen Unternehmensbedarfs zusammen mit Mitarbeitern aller betroffenen Bereiche (Entwicklung und Konstruktion; IT; Arbeitsvorbereitung) in mehreren Workshops durch die Bewertung alternativer Szenarien bezüglich einer PDMS-Einführung [2],
- die IST-Analyse der vorhandenen Daten- und Informationsflüsse (einschließlich deren Durchgängigkeit und Referenzierungen) durch Mitarbeiter-Interviews und durch die Betrachtung von ausgewählten Produkten [1; 9].

Auf die einzelnen Punkte soll im Folgenden näher eingegangen werden.

2.1 Ist-Analyse der vorhandenen IT-Landschaft

Um überhaupt eine Basis für den Einsatz eines PDMS zu schaffen, ist eine leistungsfähige Infrastruktur obligatorisch. Zur Analyse der Infrastruktur im IT-Bereich gehören die Netztopologie, mögliche Engpässe in der Netzwerkversorgung sowie die Anbindung der Server und Clients. Anhand der Netztopologie lassen sich Schwachstellen für die spätere PDMS-Anwendung bereits im Vorfeld erkennen. Dadurch lassen sich frühzeitig Maßnahmen ergreifen, um zumindest die technische Funktion des PDMS später sicherstellen zu können.

Aufgrund der üblicherweise bereits vorhandenen EDV muss als nächstes eine Analyse der Serverstrukturen erfolgen, um herauszufinden, welche Serverapplikation auf welcher Maschine läuft und welche Funktionen diese erfüllt. Im Einzelnen sind wichtig, wie die

Verbindungen der Server untereinander und die Kommunikation der Applikationen miteinander sowie die Datenschnittstellen und –redundanzen aussehen. An diesem Punkt zeigen sich zumeist bereits Verbesserungsmöglichkeiten, die noch vor der Produktivschaltung eines PDMS greifen können.

Der nächste Schritt ist eine Analyse der Client-Applikationen. Diese Analyse beschäftigt sich vordergründig mit der Frage, welche Applikationen auf den Clientrechnern benötigt werden und ob diese für den Betrieb eines PDMS entscheidend sind. Zu klären sind z.B., welche Applikationen auf welchen Rechnern eingesetzt werden, wie die Anbindung der Rechner aussieht und ob die Kommunikationsfähigkeit mit einem PDMS vorhanden ist.

Abschließend erfolgt eine Analyse der Datenstrukturen. Diese Analyse geht u.a. den Fragen nach, welche Daten zu einem Produkt gehören, welche Abhängigkeiten unter den Produktdaten bestehen und ob notwendige Referenzen vorhanden sind. Dieser Schritt ist eine wichtige Grundlage für die Schaffung des Produktdatenmodells. An dieser Stelle zeigen sich die wesentlichen, unternehmensspezifischen Einschränkungen für das Produktdatenmodell, da bei einer PDMS-Einführung sowohl die Produktivität des neuen Systems als auch die Migration bereits bestehender Daten sichergestellt werden muss.

2.2 Ist-Analyse der Entwicklungsprozesse

Im Rahmen der Qualifizierung nach ISO 9001:2000 existiert in dem betrachteten Unternehmen ein Entwicklungshandbuch (EHB), in dem der gesamte Entwicklungsprozess und dessen einzelne Teilprozesse beschrieben waren. Dieses EHB stellte die Grundlage für die Prozessanalyse dar.

Ergebnis dieser Analyse war, dass Teile des im EHB definierten Entwicklungsprozesses nur eingeschränkt PDM-fähig waren und für eine Implementierung in ein PDMS überarbeitet werden müssen. Für diese Überarbeitung bietet das EHB eine stabile Grundlage.

2.3 Identifizierung des eigentlichen Unternehmensbedarfs zusammen mit Mitarbeitern durch die Erstellung alternativer Szenarien bezüglich einer PDMS-Einführung

Ein wichtiger Aspekt bei der PDMS-Einführung ist die Akzeptanz seitens der Mitarbeiter. Aus diesem Grund müssen die Mitarbeiter bereits in einer frühen Phase miteinbezogen werden. Durch einen Workshop mit künftigen PDMS-Anwendern unterschiedlicher Nutzerprofile wurden die Anforderungen an ein PDMS diskutiert und anschließend entsprechende Bewertungskriterien festgelegt. Die erarbeiteten Szenarien wurden anhand dieser Kriterien bewertet. Die unterschiedlichen Szenarien sind in Abb.1 dargestellt.

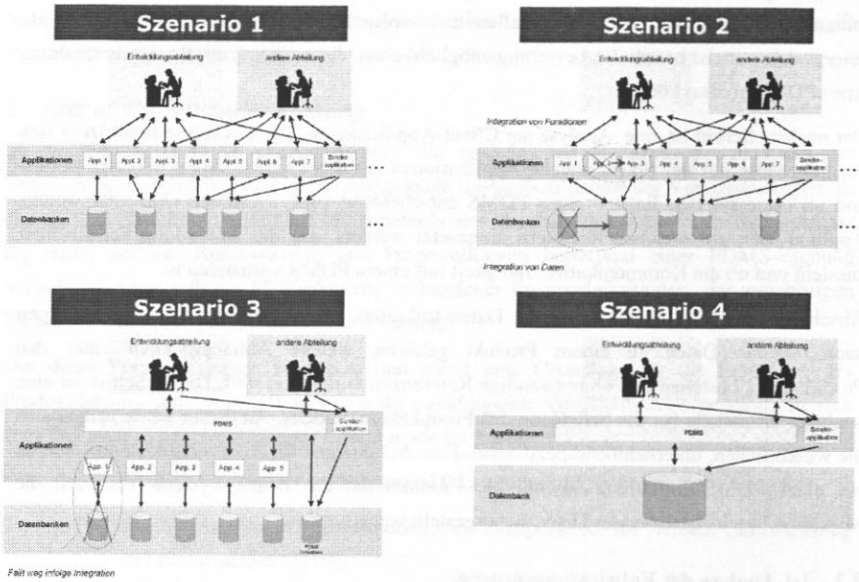


Abb.1: Alternative Szenarien zur PDMS-Einführung

Beim Szenario 1 wurde in der IT-Struktur keine Änderung eingeplant. Somit stellt dieses Szenario das zeit- und kostengünstigste dar. Ein unternehmerisches Risiko ist dabei faktisch nicht vorhanden. Beim Szenario 2 wird nach Möglichkeit die Anzahl der Datenbanken durch Integration der Daten reduziert. Die führenden Systeme bleiben jedoch unangetastet. Beim Szenario 3 wird ein PDMS eingeführt. Die Anzahl der vorhandenen Datenbanken soll dabei möglichst reduziert werden. Bestehende, führende Systeme können existent bleiben. Das PDMS verwaltet in diesem Fall hauptsächlich Metadaten und dient als Schnittstelle zwischen den bestehenden Applikationen. Beim Szenario 4 werden alle Systeme, inklusive der führenden Systeme, komplett durch ein PDMS ersetzt. Sämtliche Produktdaten werden in eine umfassende Datenbank integriert. Datenproduzierende Applikationen verwalten ihre Daten ausschließlich über das PDMS. Das letzte Szenario stellt dabei den Idealzustand einer umfassenden PDMS-Nutzung dar, ist jedoch als zeit- und kostenintensivste Umsetzung einzustufen. Das unternehmerische Risiko ist dabei sehr hoch.

2.4 Ist-Analyse der vorhandenen Daten- und Informationsflüsse

Um sämtliche Daten möglichst umfassend erkennen und aufnehmen zu können, wurden Mitarbeiterinterviews in der Entwicklungsabteilung und in angrenzenden Abteilungen durchgeführt. Diese Interviews sollten nicht nur die Informationsflüsse, Prozesstätigkeiten und Datenablageorte identifizieren, sondern auch Medien- bzw. Schnittstellenbrüche

aufzeigen. Ergänzt wurden die gewonnenen Erkenntnisse aus der Befragung durch die eingehende Analyse dreier Referenzprodukte und deren Produktstruktur.

Mit diesen Ergebnissen konnte ein Netzwerk der Daten- und Informationsflüsse zwischen den beteiligten Personen und Institutionen aufgestellt werden. Aus diesem Netzwerk lassen sich für das Produktdatenmodell entsprechende Rollen ableiten. Weiterhin wird ersichtlich, welche vorhandenen Systeme besonders berücksichtigt werden müssen (Ableitung der „führenden" Systeme, siehe Kapitel 2.1).

Die Darstellung des Daten- und Informationsfluss-Netzwerks sowie die Analyse der vorhandenen Produktstruktur liefern wichtige Zusammenhänge zwischen den Produktdatenreferenzierungen und deren Klassifizierung. Auf diesen Ansätzen beruht das im nächsten Kapitel vorgestellten Produktdatenmodell.

3 Produktdatenmodell

Ein wichtiges Ergebnis der Voruntersuchung war die Identifizierung eines nicht durchgängigen Produktdatenmodells. Dieses vorhandene Modell muss in Bezug auf die im gesamten Unternehmen verteilten erforderlichen Produktdaten sowie deren Klassifizierung und Referenzierung überarbeitet, ergänzt und strukturiert werden.

Anhand der Erkenntnisse aus der Voruntersuchung lassen sich die nachfolgenden Forderungen an ein unternehmensindividuelles und flexibel gestaltbares Produktdatenmodell aufstellen:

- Sämtliche produktrelevanten Daten werden identifiziert und klassifiziert.
- Beziehungen und Abhängigkeiten der produktrelevanten Daten untereinander werden referenziert.
- Zugehörige Mitarbeiterrollen werden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sichtweisen zu den geforderten Produktdaten festlegt.
- Der derzeit vorhandene Datenbestand muss weiterhin dargestellt werden können, um die reibungslose Einführung eines PDMS zu ermöglichen.

Des Weiteren war eine detaillierte Analyse bezüglich vorhandener Produkte und deren Strukturen erforderlich. Das Produktdatenmodell sollte die spezifischen Belange des Unternehmens berücksichtigen, damit der Aufwand zur Implementierung dieses Produktdatenmodells möglichst gering gehalten werden kann. Darüber hinaus muss das Produktdatenmodell die Fähigkeit vorhandener Systeme und auch die geplante Einführung eines neuen ERP-Systems mit berücksichtigen. Um diesen Forderungen zu genügen, wurden folgende Annahmen zur Gestaltung des Produktdatenmodells auf der untersten Gliederungsebene getroffen:

- Nach einem Kundenauftrag entsteht zunächst ein Projekt, aus dem später das eigentliche Produkt hervorgeht.
- Dem Projekt werden bestimmte Mitarbeiter in zugewiesenen Rollen zugeteilt.
- Das Produkt selbst besteht aus Baugruppen und Einzelteilen. Soll ein auf diese Weise definiertes Produkt in ein anderes Produkt komplett eingebaut werden, entspricht dies dem Einbau einer Baugruppe.
- Ein überwiegender Anteil der Aufträge ist kundenspezifisch und durchläuft die gerade beschriebenen Anforderungen. Im Falle einer Katalogbestellung erfolgt der Fertigungsauftrag unmittelbar aus dem Kundenauftrag.
- Für jedes Endprodukt existiert eine Standardverpackung. In der Praxis werden jedoch kundenspezifische Verpackungen benötigt. Dies setzt zusätzlich die Fähigkeit des ERP-Systems voraus, mit Varianten umgehen zu können.

Anhand der obigen Annahmen, die sich aus den speziellen Gegebenheiten des Unternehmens ergeben, wurde zunächst das Produktdatenmodell auf der untersten Gliederungsstufe (Abb.2) erstellt, das den Zusammenhang zwischen einzelnen Datenaspekten (Kunde, Auftrag, Projekt, Mitarbeiter, Produkt und Verpackung) abbildet.

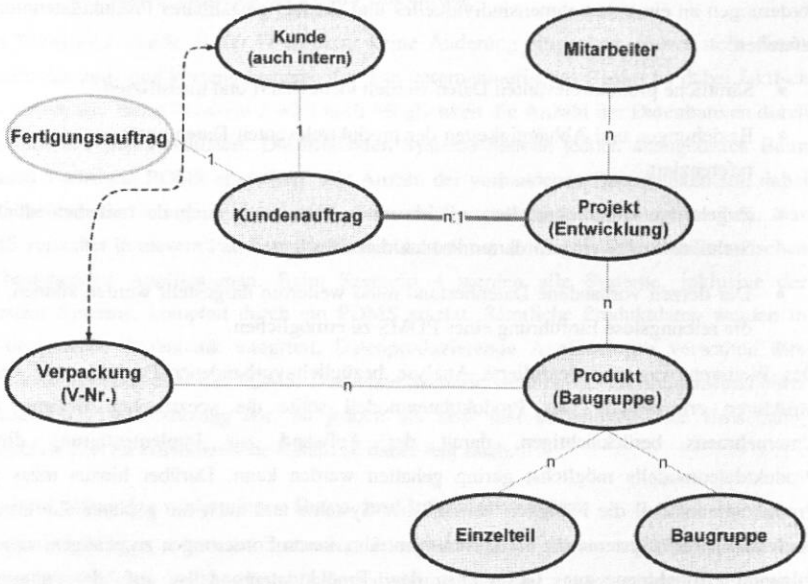


Abb.2: Produktdatenmodell (niedrigste Gliederungsebene)

Der Schwerpunkt der Anwendung dieses Datenmodells liegt in der Entwicklungsabteilung. Aus diesem Grund ist der Auftrag zur Fertigung nur als eindeutige Referenz zu einem Kundenauftrag angedeutet, jedoch nicht weiter berücksichtigt. Das Unternehmen arbeitet in erster Linie aufgrund der stark kundenspezifischen Auftragslage projektorientiert. Die Verbindung eines Produkts zu einem Auftrag wird daher über ein Projekt realisiert. Ein Auftraggeber kann sowohl ein tatsächlicher Kunde als auch das Unternehmen oder eine Tochtergesellschaft selber sein (interner Kunde). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass eine eindeutige Referenzierung zwischen Auftraggebern und Produkten vorliegt. Dies ist für die Wiederverwendung von Teilen oder Folgeaufträge wichtig. Die Zuordnung wird so gewählt, dass einem Auftrag immer genau ein Projekt zugeordnet wird, das seinerseits auf mehrere Produkte referenzieren kann. Einem Projekt können jedoch umgekehrt beliebig viele Aufträge zugeordnet werden, was dem Wunsch nach Wiederverwendung bereits verkaufter Artikel entspricht. Die Mitarbeiter werden über das Projekt referenziert, wodurch sich zum einen die Ressourcenverwaltung über das Projekt steuern lässt, zum anderen aber auch eine Aussage über die Mitarbeit an bestimmten Produkten treffen lässt. Die Verpackung hat eine eindeutige Beziehung zu einem Produkt und wird mit einem bestimmten Kunden verknüpft. Erst dadurch ergibt sich dann die Referenz zu einem Kundenauftrag.

Das Produktdatenmodell wird im weiteren Verlauf bis zur höchsten Gliederungsebene detailliert. Dabei werden alle aufgenommenen Daten aus der Voruntersuchung und Produktanalyse den einzelnen Datenaspekten zugeordnet (Abb.3). Der Schwerpunkt liegt in der Detaillierung der Produktdaten zu einem Produktdatenmodell.

Das in Abb.3 dargestellte Produktdatenmodell bildet alle das Produkt betreffenden Daten ab. Dabei ist es unerheblich, ob diese als Attribut oder Dokument vorliegen. Diese Unterscheidung wird jedoch getroffen, um für die anstehende Implementierung ein Kriterium für die Erstellung des Metadatensatzes zu gewinnen. Weiterhin hilft die Klassifizierung der Attribute, die auch im Produktdatenmodell vermerkt ist, bei der Einführung des erwähnten ERP-Systems. Durch die Klassifizierung wird eine einfache Möglichkeit geschaffen, um das Produktdatenmodell auch für zukünftige Anforderungen erweiterbar zu halten, da im wesentlichen nur die derzeit bekannten oder gewünschten Produktdaten verwirklicht werden können. Wichtig ist, dass das vorliegende Produktdatenmodell einen reibungslosen Übergang zwischen den derzeit Implementierten Systemen und einem PDMS ermöglicht.

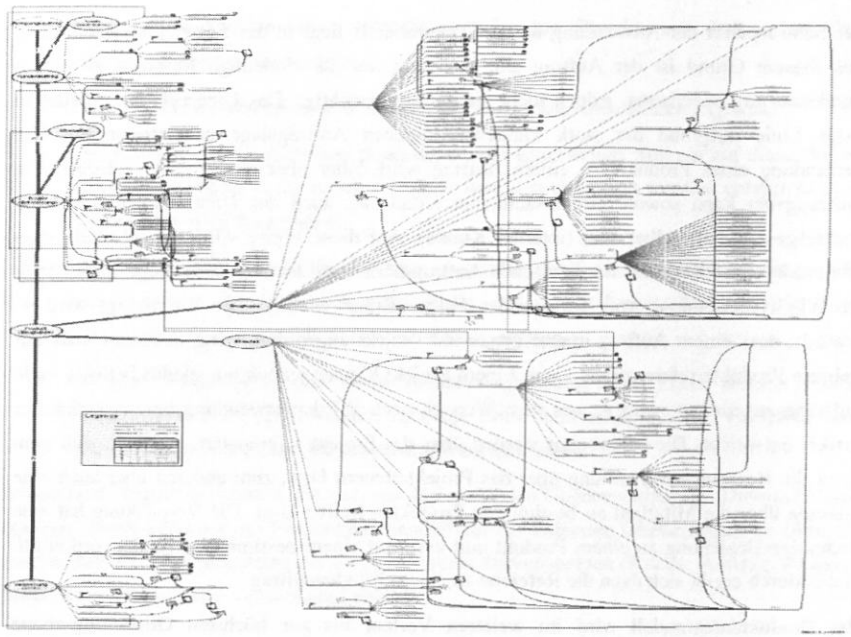


Abb.3: Das Produktdatenmodell (höchste Gliederungsstufe)

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurde eine Vorgehensweise anhand eines konkreten Industrieprojekts im Rahmen der Vorbereitungen zu einer PDMS-Einführung vorgestellt. Dabei ist einer der Schwerpunkte die Erstellung eines Produktdatenmodells, welches die Bedürfnisse des Unternehmens berücksichtigt. Diese Bedürfnisse sowie die erwarteten Wünsche und realisierbaren Ziele wurden mit den Mitarbeitern und anhand verfügbarer Dokumentationen während einer Voruntersuchung durch Workshops, Interviews und Prozess-/Produktanalysen festgestellt. Daraus ließ sich die notwendige Grundlage für ein Produktdatenmodell auf niedrigster Gliederungsebene ableiten. In einem weiteren Schritt wurden die abgeleiteten Anforderungen und Ergebnisse in das detaillierte Produktdatenmodell auf seiner höchsten Gliederungsebene eingebracht.

Bei dieser Vorgehensweise wurde sehr großer Wert auf eine dynamische und flexible Handhabung des Produktdatenmodells gelegt, damit das Unternehmen auch für zukünftige Herausforderungen gerüstet ist. Dies gewährleistet nicht nur eine ständige Aktualität des Modells in Bezug auf den augenblicklichen Unternehmensstatus, sondern ermöglicht auch auf Entwicklungen wie das Arbeiten an verteilten Standorten [5] oder die Ergänzung durch Wissensmanagementmechanismen zu berücksichtigen [4].

Literatur

[1] Berliner Kreis (2002): Technology monitoring 1/02 – Product Lifecycle Management Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik (ITM).

[2] Breiing, A.; Knosala, R. (1997): Bewerten technischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

[3] Eigner, M.; Stelzer, R. (2001): Produktdatenmanagement-Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

[4] Feldhusen, J.; Gebhardt, B.; Nurcahya, E.;. Macke, N. (2004): A knowledge-based engineering design process within product lifecycle management – a vsion. In: Horváth, I., Xirouchakis, P: Tools and methods of competitive engineering. Millpress, Rotterdam.

[5] Feldhusen, J.; Macke, N.; Nurcahya, E.; Gebhardt, B. (2004): Collaborative product commerce- ready fort he global cooperation using systematic engineering design. In: Horváth, I., Xirouchakis, P: Tools and methods of competitive engineering. Millpress, Rotterdam.

[6] Grabowski, H.; Lossack, R.; Weißkopf, J. (2002): Datenmanagement in der Produktentwicklung. Hanser-Verlag, Münschen, Wien.

[7] META-Group (2003): Product Life-Cycle Management Tools (META-spectrum 45.0). Stamford, CT 069 12-0061.

[8] Obermann, K. (2003): CAD/CAM/PLM-Handbuch 2003/04. Hanser-Verlag, München, Wien.

[9] Schöttner, J (1999): Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie. Hanser-Verlag, München, Wien.

[10] Smich, M. (2000): Erfahrungsbericht Einführung Dokumenten-Management. Vortrag auf der Tagung „Unternehmen im IT-Wandel" der ETH Zürich, Zentrum für Produkte-Entwicklung.

[11] VDI-Richtlinie 2219 (2002): Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Methodische Ansätze für die Weiterverwendung der digitalen Produktmodelle in der Produktentwicklung

Michael ABRAMOVICI, Alexander STEKOLSHCHIK

Ruhr-Universität Bochum

Keywords

Virtuelle Produktentwicklung, Digitale Modelle, Weiterverwendung, Produktentwicklung, Blended Learning

1 Einführung und Problemstellung

Die Virtuelle Produktentwicklung (VPE) umfasst die durchgehend dreidimensionale Konstruktion sowie die Simulation der Entstehung und des Verhaltens künftiger Produkte anhand digitaler Modelle und mit Hilfe von Softwarewerkzeugen [1]. Die digitalen Modelle bilden die Grundlage der rechnerintegrierten Produktentwicklung, beginnend von ersten CAD-Entwürfen bis zu umfassenden digitalen Prototypen [2], wobei die durchgängige Nutzung der Modelle die Abläufe verkürzen und optimieren soll. Abbildung 1 zeigt die Vision einer einheitlichen Digitalen Produktmodell-Referenz auf die alle Applikationen in der Produktentwicklung und –entstehung zugreifen. Diese digitale Produktmodell-Referenz sollte dabei auch Grundlage sowohl für Änderungen im Produktentstehungsprozess als auch für künftige Anpassungskonstruktionen dienen. Die reale CAD-Anwendung in der Industrie ist trotz der breiten Anwendung von 3D-CAD Systemen und der Verfügbarkeit von Produktdatenmodell-Standards (z.B. STEP) von dieser Vision noch weit entfernt. So werden für Konstruktionsänderungen und für die der Konstruktion nachgeschalteten Aufgaben immer wieder neue digitale Produktmodelle (Abbildung 2) erzeugt. Dies führt nicht nur zu einem enormen, vermeidbaren Zeit- und Kostenaufwand, sondern ist auch eine neue Fehlerquelle, da gleiche Daten in unterschiedlichen Systemen und in verschiedenen, nicht konstanten Änderungszuständen vorliegen.

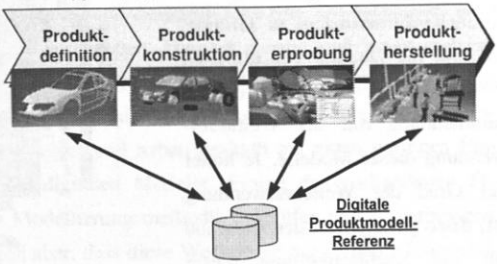


Abb.1 Vision der Digitalen Produktmodell-Referenz

Der Grund für diese unbefriedigende Situation ist, dass sich jeder Mitarbeiter auf die Lösung seiner konkreten Aufgabe und die Erfüllung eigener Anforderungen konzentriert. Die von ihm erzeugten digitalen Produktmodelle sind daher für andere Anwender oder Aufgaben kaum oder gar nicht wieder verwendbar. Um zur Verbesserung dieser Situation beizutragen, hat der Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik (ITM) Bochum in mehreren Industrieprojekten Methoden zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit von Produktdatenmodellen entwickelt. Einige dieser Methoden werden im Folgenden anhand mehrerer Praxisbeispiele beschrieben.

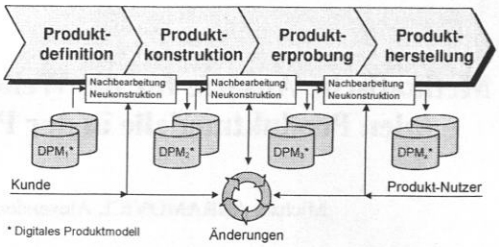


Abb.2: Aktuelle Situation

2 Erläuterungen zur Produktmodellweiterverwendung

Digitale Produktdatenmodelle sind realitätsnahe rechnerinterne Nachbildungen realer Produkte. Legt man die Definition der Produktqualität als Grad der Erfüllung von Kundenanforderungen zu Grunde, so steht die Qualität von digitalen Produktmodellen in direktem Zusammenhang mit der Weiterverwendung dieser Modelle. Je höher der Grad der Weiterverwendung ist, desto geringer ist der Aufwand für die Nachbearbeitung dieser Modelle. Demzufolge kann auch von einer Weiterverwendungsqualität von digitalen Produktmodellen gesprochen werden. Grundsätzlich können digitale Produktmodelle ganzheitlich oder nur teilweise weiterverwendet werden. Oft kann auch eine begrenzte Wiederverwendung zu hohem Nutzen führen. Darüber hinaus können die digitalen Produktmodelle oder Teil-Modelle entweder innerhalb des Konstruktionsbereiches für Anpassungs- bzw. Änderungskonstruktionen oder im gesamten Produktentstehungsprozess durch nachgelagerte Bereiche genutzt werden. Weiterhin können die Modelle entweder innerhalb einer Firma oder in firmenübergreifenden Projekten benutzt werden (Abbildung 3).

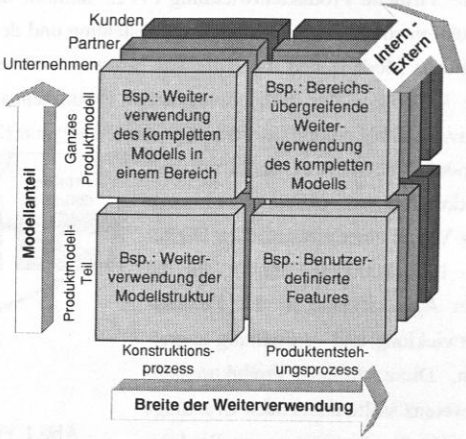


Abb.3: Möglichkeiten der Weiterverwendung von Digitalen Modellen

3 Stand der Technik und Forschung bei den Verfahren zu der Verbesserung der Modellweiterverwendung

Ein digitales Produktmodell umfasst verschiedene Inhalte wie z.B.:

- Geometrische Grundelemente
- Parameter und Constraints
- Steuerelemente
- Modellstruktur (Elemente-Struktur, Entstehungsgeschichte)
- Bauteilmodelle und Baugruppenstrukturen
- Semantik

Bei einer Weiterverwendung von digitalen Produktmodellen müssen alle diese Inhalte übernommen und weiterverarbeitet werden können. Die Qualität der geometrischen Grundelemente (numerische und geometrische Qualität) ist Grundlage und Voraussetzung für alle anderen Qualitätskriterien. Bestehende Ansätze zur Verbesserung der Weiterverwendungsqualität adressieren vor allem die numerische Qualität. Hierzu gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen, vor allem aus der Automobilindustrie (z.B. VDA-Empfehlung 4955 für den deutschen Markt [4]). Wegen der Wichtigkeit der numerischen Qualitätskriterien und deren leichte Algorithmierbarkeit wurde in letzten Jahren eine Reihe von Software-Werkzeugen zur Prüfung der numerischen Qualität entwickelt. Die meisten Programme haben die VDA-Empfehlung als Grundlage. Die Nutzung solcher Programme (z.B. Q-Checker, MODELCheck, DesignQA, PE-Check, Validat für CAD und CADfix CAE und Geomesh für FEM-Anwendungen) wird oft von vielen OEMs für ihre Zulieferer vorgegeben. Darüber hinaus sind heute mehrere Software-Werkzeuge zur Verbesserung der numerischen Qualität von digitalen Modellen zur „Modellreparatur" (so genannte Healing-Tools) auf dem Markt vorhanden. Allerdings verbessern diese Programme nur Modellierungsfehler und haben deshalb nur einen geringen Einfluss auf die Weiterverwendbarkeit der digitalen Modelle. Einige der vorhandenen IT-Werkzeuge erheben den Anspruch, die Modellierungsmethodik zu prüfen und zu verbessern. Bei einer genauen Betrachtung zeigt sich aber, dass diese Werkzeuge nur formelle Konventionen und Aspekte der geometrischen Elemente und Modelle überprüfen.

Über die aufgezeigten Software-Werkzeuge hinaus existieren nur wenige Ansätze zur Verbesserung der allgemeinen nichtnumerischen Weiterverwendung von digitalen Produktmodellen. Die meisten durchgeführten Forschungsprojekte konzentrieren sich auf die Standardisierung der Produktmodelle ohne Berücksichtigung der Parameter, Constraints und Entstehungsgeschichte der Modelle, die für die Weiterverwendung entscheidend sind. In einigen Arbeiten ([6], [7]) wurden erste Schritte in Richtung der Verbesserung der Modellierungsmethodik gemacht, wobei oft nur die CAD-Modelle im Mittelpunkt standen. Am ITM-Bochum wurden im Rahmen eines Industrieprojektes Ansätze zur Verbesserung der Weiterverwendung von digitalen Produktmodellen unter Anwendung von Methoden des Qualitätsmanagements entwickelt.

4 Ansätze zu der Wiederverwendung von digitalen Produktmodell-Teilen

4.1 Weiterverwendung der Modellstruktur

Die unterste Stufe der Weiterverwendung von digitalen Produktmodellen bildet die Übernahme der Modellstruktur vorhandener Produktmodelle für Anpassungskonstruktionen bzw. für weitere Ingenieuraufgaben (z.B. Berechnung oder Betriebsmittelkonstruktion). Die Modellstruktur beschreibt die hierarchische Zuordnung einzelner Konstruktionsfeatures, spezifischer Elementen, Fertigungsinformationen oder weiterer Geometrielementen (z.B. Hilfsgeometrie oder Skizzen) zum gesamten Produktmodell. Oft werden solche Strukturen als Startmodelle bezeichnet, weil sie gewisse Einstellungen und einen Vorschlag der Modellstruktur vorgeben, aber keine weiteren Modellelemente wie z.B. Geometrie oder Randbedingen enthalten.

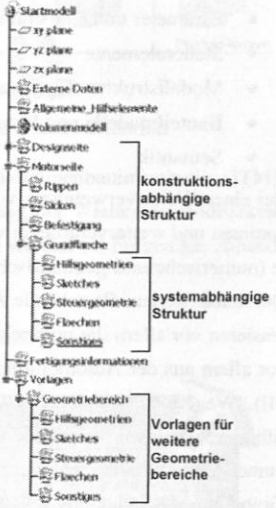


Abb.4: Struktur eines digitalen Modells einer Motorhaube

Bild 4 zeigt beispielhaft die Struktur des digitalen Modells einer Motorhaube erstellt mit dem CATIA-V5-System. Man kann in der Struktur klar erkennen, dass der Aufbau der Bereiche sowohl durch die technische Produktaufteilung als auch durch die Modellierungsbesonderheiten bedingt ist. Sollte jetzt eine Konstruktion einer anderen Motorhaube angestoßen werden, kann dieses Startmodell weiterverwendet werden, indem man einige Bereiche vollständig übernimmt und die anderen anpasst oder mit Hilfe der Bereichsvorlagen neu erstellt. Der Konstrukteur wird unterstützt, indem durch die Struktur eine gewisse Modellierungsmethodik zwangsläufig vorgeschlagen wird. Die Modellstruktur darf nicht zu starr festgelegt sein. Sie sollte regelmäßig, am Besten nach dem Abschluss großer Projekte, kritisch überprüft und bei Bedarf ergänzt bzw. aktualisiert werden.

Abbildung 5 zeigt die methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung der Modellstruktur. Wichtig ist, dass der Strukturierungsprozess sowohl die konstruktionsabhängigen

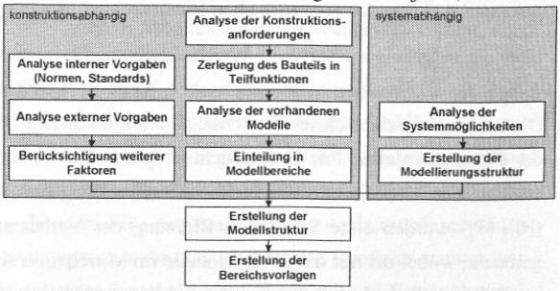


Abb.5: Ablaufdiagramm für die Erstellung der Modellstruktur

(funktionsbedingte) als auch die systemabhängigen (modellierungsbedingte) Faktoren berücksichtigt. Die Grundlage des entwickelten Workflows sind die Analysen der vorhandenen Modelle und der bevorstehenden Konstruktionen. Diese Analysen haben als Ziel die Modelle in Bereiche einzuteilen. Die Einteilung kann unter unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen, zum Beispiel aus Fertigungsgründen oder bedingt durch die Konstruktionsreihenfolge. Das Produkt sollte je nach einzelnen Teilfunktionen zerlegt werden, woraus wichtiges Input für die Einteilung in Bereiche entstehen kann. Der konstruktionsabhängige und systemabhängige Zweig beeinflussen sich gegenseitig sehr stark. Am Ende werden beide Strukturen zusammengeführt, sodass die einzelnen bauteilabhängigen Modellbereiche in die modellierungsbedingten Elemente gegliedert sind. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass sich sogar ähnliche Konstruktionen unterscheiden und somit zusätzliche Modellbereiche haben können, für die in einem Strukturstartmodell Vorlagen vorhanden sein sollen, die den modellierungsbedingten Aufbau abbilden.

4.2 Weiterverwendung von benutzerspezifischen Features

Die nächste Stufe der Weiterverwendung stellt die Nutzung von Modellbereichen in Form von benutzerspezifischen Features dar. Derartige benutzerdefinierte Konstruktionselemente sollten für die Weiterverwendung einfacher, sich oft wiederholender Modellbereiche in Erwägung gezogen werden. Sie eignen sich besonders gut für spezielle Detailmodellbereiche, wie z.B. Taschen, Versteifungen, Bohrungen usw. und bieten eine relativ einfache Möglichkeit, Modellelemente zu verwenden und das Konstruktions-Know-how zu speichern.

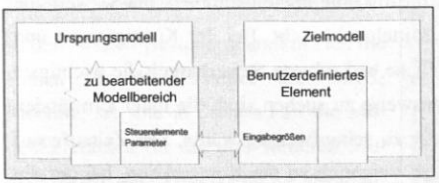


Abb.6: Aufbau eines benutzerdefinierten Elementes

Für den Aufbau der Benutzerfeatures gelten folgende Grundsätze (Abbildung 6)

- Die zu bearbeitenden Modellbereiche sollten klare Steuergrößen und Parameter aufweisen, die später als Eingabegrößen für die Weiterverwendung dienen können.
- Nur Bezüge, Referenzen und Bedingungen zu den vordefinierten Steuergrößen dürfen enthalten sein. Absolute Bezüge (z. B. zu Koordinatensystemen) sind zu vermeiden.
- Bei der Modellierung müssen unterschiedliche Einsatzfälle berücksichtigt werden, weshalb das Erstellungssystem und die Zielmodelle intensiv zu untersuchen sind.

- Die Struktur der Modellbereiche muss so optimiert werden, dass bei der späteren Instanzierung der Bereichsaufbau leicht nachvollzogen werden kann.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für ein benutzerspezifisches Feature, eine Rippe mit einer Sonderform. An diesem Beispiel kann man den Unterschied zwischen den Steuerelementen und Parametern erkennen. Die Steuerelemente spielen die Rolle der Schnittstelle mit den anderen Modellbereichen und dienen als Grundlage für die Bestandteile des neuen Modellbereiches, die darauf aufbauen. Die typischen Aufgaben dieser Steuerelemente sind z.B. die richtige Platzierung des benutzerdefinierten Elementes im Modell und die Anpassung der Bereichsgestalt an das neue Modell. Die Parameter hingegen dienen ausschließlich der Steuerung der bereichsinternen Elemente und Zusammenhänge.

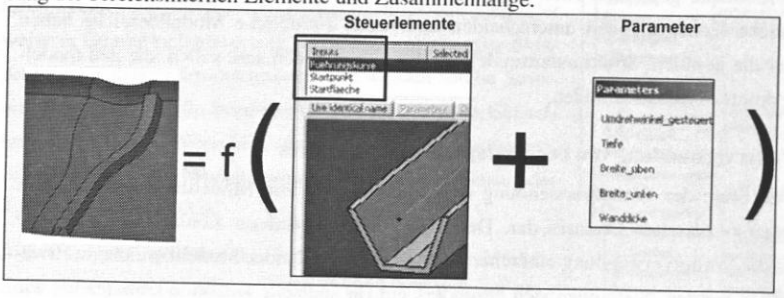


Abb. 7: Beispiel eines benutzerdefinierten Elementes

Wichtig ist, dass die Erstellung der benutzerdefinierten Elemente nicht in jedem Fall mit der Modellierungsvorgehensweise der üblichen Konstruktion übereinstimmen muss, weil die Weiterverwendung in mehreren Modellen im Mittelpunkt steht. Bei der Konzipierung und Modellierung solcher Modellteile spielt die einfache und robuste Steuerbarkeit die wichtigste Rolle, weshalb oft neue Modellierungsvorgehensweise zu suchen sind, die unter Umständen in der täglichen Konstruktion nicht optimal oder zu zeitaufwendig wären. Der Zeitaufwand für die Konzipierung ist normalerweise höher im Vergleich zu der Konstruktion, bei der die Weiterverwendung nicht im Mittelpunkt steht. Dadurch, dass diese Elemente später von mehreren Konstrukteuren in mehreren Modellen verwendet werden, kann die Erstellungszeit aber fast vernachlässigt werden. Eine sehr wichtige Rolle bei der Erstellung spielt das Testen der benutzerdefinierten Elemente. Es muss ein Testplan (siehe ein Ausschnitt in Tabelle 1) erstellt werden, in dem die meisten möglichen Situationen abgebildet werden, insbesondere Variationen der Eingabearten, -werte und Parameter.

Steuergröße, Parameter	Beschreibung	Art, Wert, Wertebereich	Ergebnis
Center curve	Führungskurve der Versteifung	Spline	ok
		Linie	ok
		Kreis	ok
		Zusammengesetzte Kurve	Fehler
Height	Höhe der Versteifung	5 - 10 mm	ok
Wall thickness	Wanddicke	0,5 mm	ok
		1 mm	ok
		1,5 mm	Fehler

Tabelle 1 Ausschnitt eines Testplans

4.3 Weiterverwendung digitaler Produktmodelle für nachgelagerte Aufgaben in Produktentstehungsprozess

Die umfassende Betrachtung der Produktentwicklung zeigt, dass ein typisches digitales Modell bei einer durchgehenden Verwendung durch eine Vielzahl von internen und externen Abteilungen, Kunden und Partnern eingesetzt, geändert und weitergeleitet wird. Man kann diese Abteilungen/Personen (oder auch IT-Systeme) Modellkunden und Modellerzeuger nennen. Bei den abteilungsübergreifenden Prozessen liegt das Problem darin, dass die in der Modellnutzungskette später liegenden Bereichen (z.B. Berechnung, Fertigungsvorbereitung, Visualisierung usw.), die auf die Modelle der Vorgängerphasen angewiesen sind, in den meisten Fällen sehr viel Zeit für die Modellnachbearbeitung aufwenden müssen. In einigen Studien [3] wurde gezeigt, dass viele Abteilungen mehr als 50% ihrer Arbeitszeit mit der Korrektur, Nachbearbeitung und Neuerstellung digitalen Daten verbringen, weil bei der Modellierung ihre Anforderungen nicht berücksichtigt wurden. Erst wenn ein Modellkunde mit der Qualität des Modells zufrieden ist, kann er das Modell mit geringem Aufwand weiterverwenden.

Abbildung 8 zeigt einige Beziehungen zwischen den Modellkunden und –erzeugern für ein konkretes Bauteil. In der ersten Beziehung agiert die 3D-CAD-Konstruktion als Modellerzeuger und FEM, Montage- und DMU-Abteilungen als Modellkunden der Konstruktion, weil sie die CAD-Modelle weiterverwenden.

Abb.8: Modellkunden und –erzeuger

In der zweiten Beziehung ändern sich die Rollen für die Ersteller der DMU-Modelle; sie sind in diesem Fall die Modelllieferanten für die drei weiteren Modellkunden, die ihre Modelle nachbearbeiten. Da somit die Modellkunde-Modellerzeuger-Beziehung die wichtigste Beziehung für die gute Qualität der Modelle ist, steht die Erfüllung der kundenbezogenen Qualitätsanforderungen im Mittelpunkt. Die Akquisition, Aufnahme, Klassifikation, Verarbeitung und Vermittlung der Anforderungen bilden die Grundlage für die optimale Weiterverwendung von digitalen Produktmodellen. Viele Faktoren erschweren diese Aufgabe.

Die Betrachtung zeigt, dass der Modellerzeuger in den meisten Fällen eigene Qualitätskriterien verwendet, die oft in Gegensatz zu den Qualitätsanforderungen der Modellkunden stehen Die Anforderungen, die von einzelnen Modellkunden gestellt werden, sind oft sehr allgemein

formuliert, widersprüchlich und unverträglich zu einander. Tabelle 2 zeigt einige Anforderungen gemäß den Beziehungen aus Abbildung 8.

Wenn man diese Anforderungen genauer betrachtet, dann lässt sich Folgendes feststellen:

- Anforderungen 1.1 und 2.1 sind unverträglich.
- Anforderung 1.3 ist sehr allgemein und kann nicht verarbeitet werden.
- Einige Anforderungen werden von den nachfolgenden Modellkunden geerbt (Anforderung 2.1 wurde von dem Modellkunden „Flächen-Analyse" geerbt).

Modellkunde	Modelllieferant / -erzeuger	Anforderung	Nr.
FEM-Abteilung	3D-CAD	alle Einzelheiten müssen entweder abschlatbar sein oder im Modell nicht vorhanden.	1.1
		Material im Modell definiert	1.2
		Randbedingungen müssen am Modell einfach definierbar sein.	1.3
DMU-Abteilung	3D-CAD	Die Flächen müssen exakt wie später bei dem fertigen Produkt aussehen.	2.1
		Die äußere Hülle muss für die Toleranzanalysen die Oberfläche exakt abbilden.	2.2
		Die Baugruppenstruktur muss für die Zusammenbauanalysen vorhanden sein.	2.3

Tabelle 2 Auszug einiger Anforderungen

Dieses Beispiel macht deutlich, dass weitere Methodenbausteine vorhanden sein müssen (Abbildung 9). Abbildung 9 zeigt den gesamten Ablauf der Methode für die Optimierung der prozessübergreifenden Verwendung der Modelle. Im ersten Schritt werden die Produktentwicklung und die vorhandenen digitalen Modelle analysiert, damit die vorhandenen Modellkunden und somit auch die entsprechenden Erzeuger/Kunde-Beziehungen bekannt sind. Die Modellkundeneinbeziehung ist Grundvoraussetzung für eine vollständige und eindeutige Darstellung von Anforderungen. Neben ihrer lückenlosen Identifizierung ist es aber wichtig, den Kunden Gruppen zuzuordnen (z.B. CAE-Prozesse, Fertigungsvorbereitung-Prozesse usw.). Darauf hin ist zu ermitteln, ob den Personen oder Gruppen die gleiche Wichtigkeit im Entscheidungsprozess beigemessen wird, oder sie unterschiedlich zu gewichten sind. Nur so ist zu gewährleisten, dass bei einer Vielzahl von Aussagen/Anforderungen diejenigen berücksichtigt werden, die von bedeutenden Modellkunden geäußert werden.

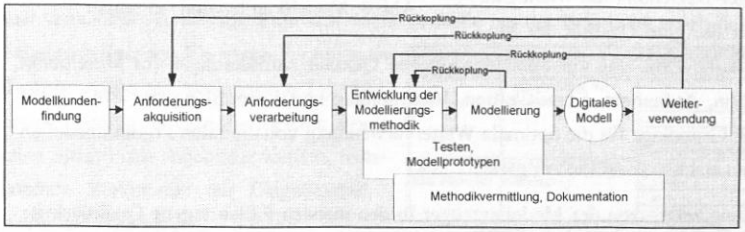


Abb. 9: Ablaufdiagramm für die Verbesserung der prozessübergreifenden Weiterverwendung

Die Anforderungsakquisition konzentriert sich auf die Ermittlung der Bedürfnisse bzw. Formulierungen in Prosatext, die zu einem späteren Zeitpunkt in technisch korrekte Anforderungen verarbeitet werden. Dieser Schritt, als Erfassung der „Stimme des Kunden" bezeichnet, ist eine Vorstufe für die spätere Erstellung der entsprechenden Modellierungsmethodik. Zwischen den Anforderungen werden Beziehungen aufgebaut, die in der Datenbank verwaltet werden. Die Anforderungsstruktur kann mit der Struktur des Produkts direkt verknüpft werden. Es wird möglich, bestehende Anforderungsstrukturen zu kombinieren, Teile zu löschen oder auszutauschen und damit völlig neue Anforderungsgebilde zu konzipieren. Durch die direkte Verknüpfung mit einem Produkt oder dem digitalen Modell werden bei einer Kombination von digitalen Modellen die Anforderungsstrukturen mitkopiert. Damit kann die Zeit für die Entwicklung neuer Anforderungen reduziert werden. Dabei ist eine Verkürzung des Prozesses für die Neudefinition von Anforderungen möglich.

Der nächste Schritt ist die Entwicklung einer Modellierungsmethodik, die sehr systemnah verläuft, damit die zu konzipierenden Modellierungsvorgehensweisen in dem konkreten CAx-System realisierbar sind. Die Ausarbeitung der Modellierungsmethodik ist die anspruchsvollste Phase im ganzen Workflow. An dieser Stelle sollte ein Team gebildet werden, das aus Vertretern der CAx-Betreuungsabteilung und der Fachabteilung besteht. Einerseits es ist sehr wichtig, dass vorhandenes Modellierungs-Know-how der entsprechenden Fachabteilungen berücksichtigt wird. Andererseits kann die Nichteinbeziehung der Modellerzeuger in die Methodikerstellung zu Akzeptanzproblemen führen. In vielen Fällen ist es den Konstrukteuren nicht bewusst, dass die von ihnen erstellten Modelle, die numerisch eine gute Qualität aufweisen, von ihren Modellkunden entweder nicht oder nur mit aufwendiger Nachbearbeitung weiterverwendet werden können. Die rechtzeitige Einbeziehung in die Planung kann diese Probleme zum größten Teil lösen.

Parallel zu der Methodikentwicklung erfolgen die Modellierungen einiger Prototypen, an denen die Anforderungen der Modellkunden getestet werden können. Schon bei der Methodikerstellung sollten die Möglichkeiten der Vermittlung und Dokumentation konzipiert werden, weil viele sogar gute Methoden in der Praxis durch die schlechte Vermittlung an die Konstrukteure scheitern. Am Ende erfolgt die Modellierung, wonach ein fertiges digitales Modell zur Verfügung steht. An diesem Punkt kann noch nicht umfassend beurteilt werden, ob es später optimal verwendet kann. Nur die Modellkunden können während der Weiterverwendung dies bewerten. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig, dass die Rückkopplung zwischen den Modellkunden zu den Modellerzeugern und Methodenentwicklern sowohl in der Phase der Weiterverwendung als auch während der Methodikentwicklung gewährleistet ist, so dass diese Informationen rechtzeitig berücksichtigt werden können.

5 Zusammenfassung

Die vorgestellten Methoden und Zusammenhänge zeigen, dass in den meisten Unternehmen unterschiedliche und oft unentdeckte Möglichkeiten vorliegen, die digitalen Modelle zu nutzen bzw. die Nutzung zu optimieren. Die Einführung der CAx-Verfahren allein reicht für die Ausschöpfung aller Potenziale nicht aus. Nicht nur die geometrische und numerische Qualität eines Modells sondern die Modell-Weiterverwendung ist entscheidend für die effiziente Nutzung virtueller Produktentwicklungsmethoden. Die Weiterverwendung der Modellteile kann in den meisten Fällen zu folgenden Vorteilen führen:

- Zeitminimierung für die nichtkreativen Tätigkeiten
- Standardisierung der Produktmodelle
- Bereichsweite einheitliche Modellierungsweise
- Minimierung der Fehlerpotentiale bei der Modellierung
- Bessere Änderungsfreundlichkeit der fertigen Modelle durch die einfachere Nachvollziehbarkeit des Modellaufbaus

Die Optimierung der prozessübergreifenden Modellweiterverwendung ist ein wichtiges Werkzeug für die Vermeidung der zahlreichen Nachbearbeitungen und kann damit entscheidend zu einer früheren Produkteinführung führen.

Literatur

[1] Abramovici, M.; Borilski, K.: E-Learning-Konzepte und –lösungen für die virtuelle Produktentwicklung, Dresdner Maschinenelemente Kolloqium, Seiten 739-752, Verlag Mainz, Aachen, 2003

[2] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt, Hanser Verlag, München 1997

[3] Research Triangle Institute: Interoperability Cost Analysis of U.S. Automotive Supply Chain, March 1999

[4] VDA-Empfehlung 4955: Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten, Arbeitskreis "CAD/CAM" im VDA-Rohstoff-Ausschuss, 1999

[5] Meißner, M.: Methoden zur qualitätsgerechten CAD-Modellerzeugung für die virtuelle Produktentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie, Shaker Verlag, Aachen 2000

[6] Schenke, F.-B.: Methodik zur parametrischen Konstruktion – Ein Beitrag zur integrierten produkt- und Prozessgestaltung, Shaker Verlag, Aachen 2001

[7] Mendgen, R.: Methodische Vorgehensweise zur Modellierung in parametrischen und featurebasierten 3D-CAD-Systemen, Shaker Verlag, Aachen 1999

Domänenübergreifende Spezifikation der Prinziplösung von selbstoptimierenden Systemen des Maschinenbaus

Jürgen GAUSEMEIER, Ursula FRANK, Andreas SCHMIDT, Henner VÖCKING

Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

Abstract

Selbstoptimierende Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen. Sie sind lernfähig und optimieren ihr Verhalten während des Produktlebenszyklus. Der Schlüssel beim Entwurf selbstoptimierender Systeme liegt in der Verwendung rekonfigurierbarer Systemelemente, leistungsfähiger Kommunikationsstrukturen und Erfahrungswissen. Dazu werden Wirkprinzipien der Selbstoptimierung als erfolgreich erprobte Verhaltensmuster benutzt. Sie geben allgemeingültige Wirkstrukturen und in ihnen ablaufende Prozesse für selbstoptimierungstypische Funktionen vor. Ein entscheidendes Resultat im Rahmen der Entwicklung ist die Prinziplösung, die am Ende der Konzipierung vorliegt. Mit ihr sind die wesentlichen Weichenstellungen für den Aufbau und die Funktionsweise des Systems erfolgt. Zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme wird eine Spezifikationstechnik vorgestellt. Damit wird eine wichtige Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der Fachleute aus den involvierten Domänen Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik geschaffen.

Keywords

Entwurfsmethodik, Mechatronik, Selbstoptimierung, Prinziplösung, Spezifikationstechnik.

Diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich 614 - Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus, Universität Paderborn - entstanden und wurde auf seine Veranlassung unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel veröffentlicht.

1 Einführung

Die Informationstechnik durchdringt immer mehr das Gebiet des konventionellen Maschinenbaus. Dies führt zu einem erheblichen Innovationspotenzial. Die meisten Erzeugnisse des Maschinenbaus beruhen schon heute auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik, was durch den Begriff Mechatronik zum Ausdruck kommt. Ziel der Mechatronik ist es, das Verhalten eines technischen Systems zu verbessern, indem mit Hilfe von Sensoren Informationen über die Umgebung, aber auch über

das System selbst erfasst und für optimale Reaktionen des Systems verarbeitet werden. Vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklung der Informationstechnik zeichnen sich weitere Möglichkeiten ab, die weit über die Mechatronik hinausgehen – Systeme mit inhärenter Teilintelligenz. Dafür verwenden wir den Begriff Selbstoptimierung. Selbstoptimierende Systeme passen sich autonom an ändernde Umfeldbedingungen an. Das Paradigma der Selbstoptimierung eröffnet für den Maschinenbau und artverwandte Branchen faszinierende Perspektiven. Zu beschreiben, was intelligente maschinenbauliche Erzeugnisse tun sollen, ist nicht schwer. Sie zu entwerfen stellt die große Herausforderung dar. Bisherige Methoden und Vorgehensweisen zur Entwicklung mechatronischer Systeme wie z.B. die Richtlinie VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme" [VDI03] sind für die Entwicklung selbstoptimierender Systeme nicht ausreichend. Daher ist Ziel des SFB 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus" eine Entwurfsmethodik für derartige Systeme. Aspekte dieser Entwurfsmethodik wie die Wirkmuster zur Selbstoptimierung und eine Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme werden in diesem Beitrag vorgestellt und an einem Beispiel der Neuen Bahntechnik Paderborn verdeutlicht. Zuvor werden das Paradigma der Selbstoptimierung erläutert und Besonderheiten selbstoptimierender Systeme aufgezeigt.

2 Selbstoptimierende Systeme

Künftige Systeme des Maschinenbaus werden aus Konfigurationen von intelligenten Systemelementen bestehen. Das Verhalten des Gesamtsystems wird durch die Kommunikation und Kooperation intelligenter Systemelemente geprägt. Softwaretechnisch handelt es sich um verteilte Systeme von miteinander kooperierenden Agenten (Bild 1).

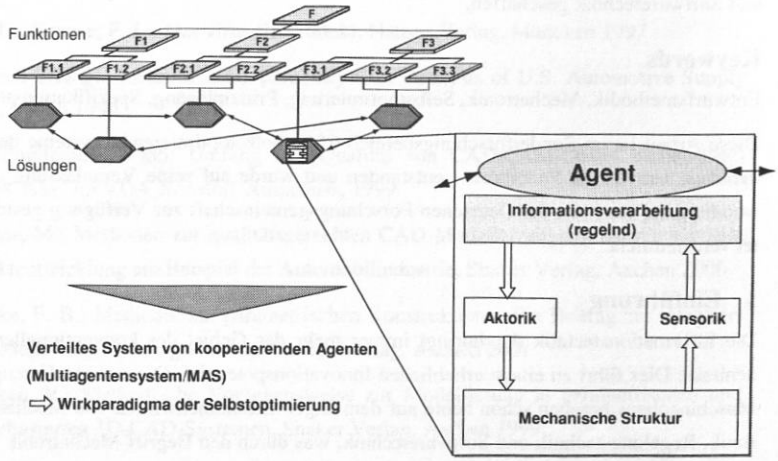


Abb.1: Die Basisidee - Maschinenbauerzeugnisse mit inhärenter Teilintelligenz

Agenten sind autonome und adaptive Funktionsmodule, die eigenständig Aktionen initiieren können. Die Funktionsmodule stellen heterogene Teilsysteme mit mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten dar. Das Verhalten der Agenten kann zur Laufzeit angepasst werden, was durch den Begriff adaptiv bezeichnet wird [SFB01].

Vier grundsätzliche Aspekte kennzeichnen nach Bild 2 ein selbstoptimierendes System: Das Zielsystem, im Sinne einer Konstellation von mehreren Zielen; die Struktur, das heißt die Systemelemente und deren Beziehungen; das Verhalten, das die Reaktion des Systems auf Umfeldeinflüsse beschreibt; die Parameter, die Komponenten des Systems charakterisieren. Das Zielsystem formuliert das geforderte, gewünschte oder zu vermeidende Verhalten des Systems. Die Selbstoptimierung zeichnet sich durch zwei Eigenschaften aus:

- die endogene Änderung des Zielsystems aufgrund veränderter Einflüsse auf das technische System, die aus der Umwelt, dem Benutzer oder aus dem System selbst resultieren, und
- die zielkonforme, selbständige Anpassung von Parametern, Verhalten und Struktur.

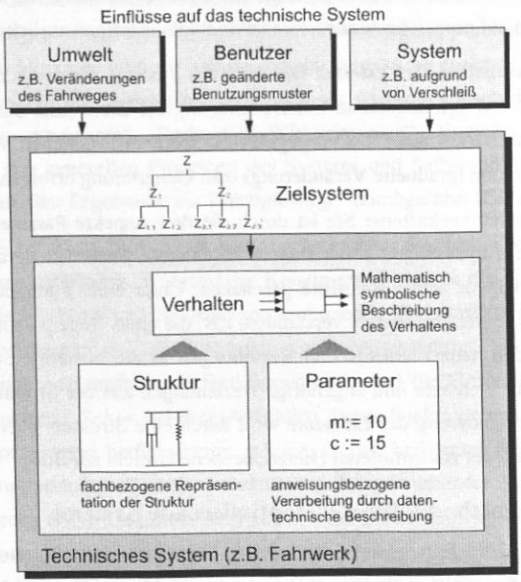


Abb. 2: Die Aspekte Ziel, Verhalten, Struktur und Parameter

Es wird angestrebt, die Selbstoptimierung auf der Basis von mathematischen Modellen durchzuführen, d.h. die Optimierung erfolgt mittels eines physikalisch realistischen Modells der Regelstrecke mit Hilfe von Anregungs- und Bewertungsmodellen. Der Optimierungsvorgang wirkt sich also zunächst nicht auf das tatsächliche System aus. Beispielsweise werden neu

ermittelte Parameter in dem Regler erst dann überblendet, nachdem das Optimierungsergebnis vorliegt und die Parameter verifiziert wurden. Die Verwendung von Modellen wird allerdings mit vertretbarem Aufwand häufig nicht möglich sein. Daher ist neben dieser modellbasierten Selbstoptimierung eine verhaltensbasierte Selbstoptimierung vorgesehen. Sie funktioniert kognitiv, quasi nicht deterministisch, d.h. Veränderungen während des Betriebes werden wahrgenommen und analysiert. Auf dieser Grundlage werden Schlüsse gezogen. Diese Schlüsse können dazu führen, dass ein anderes mathematisches Optimierungsmodell geladen bzw. auf Erfahrungswissen (gelernte Strukturen, Verhalten oder Parametereinstellungen) zurückgegriffen wird, wenn die Grenzen der vorhandenen Modelle überschritten werden.

Bei dieser Form der Selbstoptimierung wird fortlaufend ein Prozess bestehend aus den drei Aktionen „Analyse der Ist-Situation", „Bestimmung des aktuellen Zielsystems" und „Anpassung des Systemverhaltens" ausgeführt. Diesen Prozess bezeichnen wir als Selbstoptimierungsprozess. Im Folgenden werden die drei Aktionen näher erläutert:

Analyse der Ist-Situation: Zunächst wird der Zustand des Systems und seiner Umgebung erfasst. Informationen können dabei auch indirekt durch Kommunikation mit anderen Systemen erfasst oder es kann auf gespeicherte zurückliegende Beobachtungen zurückgegriffen werden.

Bestimmung des aktuellen Zielsystems: Die Ziele des Systems werden je nach vorliegender Situation festgelegt und ggf. angepasst. Die Bestimmung der Ziele kann durch Auswahl (Selektion einer Alternative aus einer fest vorgegebenen, diskreten, endlichen Menge von möglichen Zielen), Anpassung (graduelle Veränderung) oder Generierung erfolgen.

Anpassung des Systemverhaltens: Sie ist durch die drei Aspekte Parameter, Struktur und Verhalten bestimmt. Anpassungen können durch Parameter-, Strukturänderungen oder durch Verändern des Verhaltens seiner Elemente geschehen. Unter einer Parameteränderung wird die Änderung eines Systemparameters verstanden, z.B. die eines Regelparameters. Bei Strukturänderungen werden neue Elemente und Beziehungen in die bisherige Struktur integriert bzw. bisher genutzte Elemente und zugehörige Beziehungen aus der Struktur herausgenommen. Eine Verhaltensänderung der Elemente wird durch eine Struktur- oder Parameteränderung der Elemente auf der nächsttieferen Hierarchieebene erreicht [SFB04].

3 Entwicklungsmethodik für selbstoptimierende Systeme

Die Richtlinie VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme" schlägt einen systematischen domänenübergreifenden Entwurfsprozess für mechatronische Systeme vor. Basis der hier betrachteten mechatronischen Systeme (Mehrkörpersysteme mit einem kontrollierten Bewegungsverhalten) ist ein Regelkreis bestehend aus einer mechanischen Struktur, Sensoren, einer Online-Informationsverarbeitung und Aktoren. Die aktive Beeinflussung der mechanischen Struktur ermöglicht dem System Störungen zu kompensieren und sich veränderten Umfeldbedingungen anzupassen [IBH02]. Während des Entwurfs legt der Entwickler

das Verhalten des mechatronischen Systems fest. Dazu werden relevante Einflüsse auf das System identifiziert. Dann wird ein Regler entworfen, der den Anforderungen genügt und unter den identifizierten Umständen ein akzeptables Verhalten realisiert.

Im Gegensatz zum Entwurf mechatronischer Systeme soll beim Entwurf selbstoptimierender Systeme nicht jede Einsatzsituation vom Entwickler antizipiert und in der Regelung berücksichtigt werden, sondern nur grundlegende Situationen. Darüber hinaus werden im System Möglichkeiten zur selbstständigen Anpassung vorgesehen und es werden ihm Grenzen aufgezeigt, in denen es diese Selbstoptimierung durchführen darf. Auf diese Weise kann das System bei sich ändernden Bedingungen innerhalb der vorgegebenen Grenzen optimal handeln.

Während der Produktentwicklung müssen insbesondere während der Konzipierung Selbstoptimierungspotenziale identifiziert, Ideen zu deren Umsetzung gefunden, diese konkretisiert und spezifiziert werden. Ziel ist es, am Ende der Konzipierung eine Prinziplösung vorliegen zu haben, die auf der einen Seite die Wirkungsweise des Systems beschreibt und auf der anderen Seite als Grundlage für die folgende Ausarbeitung dient. Ausgehend von wichtigen Einsatzsituationen des zu entwickelnden selbstoptimierenden Systems werden grundlegende Wirkstrukturen und generelle Prozesse des Systems sowie Selbstoptimierungsprozesse vorausgedacht und um Möglichkeiten zur selbstständigen Anpassung ergänzt. Insgesamt werden die Schritte „Definieren von Anwendungsszenarien für wichtige Einsatzsituationen", „Aufstellen von Funktionsstrukturen", „Suche nach Wirkprinzipien", „Erstellen von Wirkstrukturen", „Definieren von generellen Prozessen des Systems und Selbstoptimierungsprozessen" und „Konkretisieren aller Ergebnisse zur Prinziplösung " durchgeführt [GFS04].

Wie bereits aufgeführt, können innerhalb selbstoptimierender Systeme während des Betriebs Strukturanpassungen stattfinden. Während der Konzipierung werden diese Strukturanpassungen durch eine alle Elemente und Beziehungen umfassende Wirkstruktur, in Einsatzsituationen aktiven Wirkstrukturen und Konfigurationsregeln berücksichtigt. Entsprechend gibt es auch eine alle Funktionen umfassende Funktionsstruktur und für Einsatzsituationen spezifische Funktionsstrukturen. Schon bei dem Aufstellen dieser Funktionsstrukturen können Ansätze der Selbstoptimierung berücksichtigt werden. Neben herkömmlichen Funktionen wie „Energie speichern" enthalten Funktionsstrukturen selbstoptimierender Systeme Funktionen zur Selbstoptimierung (F_{SO}) wie „Ziele bestimmen" oder „Erfahrungswissen nutzen". Für das Aufstellen von Funktionsstrukturen selbstoptimierender Systeme wird im SFB614 ein Funktionskatalog mit herkömmlichen Funktionen und F_{SO} erarbeitet. Weitere Möglichkeiten zum Einbringen von Selbstoptimierung in ein System ergeben sich durch den Einsatz von **Wirkmustern zur Selbstoptimierung** (WM_{SO}) zur Realisierung von Funktionen. Ähnlich wie Wirkprinzipien aus der Mechanik (z.B. Hebelprinzip) oder Entwurfsmuster der Softwaretechnik (z.B. Zuständigkeitsketten) geben sie grundsätzliche Muster vor, die die Umsetzung der geforderten Funktionen spezifizieren. WM_{SO} beschreiben u.a. durch welche Art von Elemen-

ten das WM_{SO} grundsätzlich realisiert werden kann, deren Beziehungen untereinander, welche Methoden sie nutzen und in welcher Reihenfolge sowie in welcher Art und Weise die Elemente miteinander agieren. Im SFB 614 werden die WM_{SO} gesammelt, für den Einsatz in der Produktentwicklung aufbereitet und in einem Katalog bereitgestellt. Beispielsweise kann mit Hilfe dieses Katalogs nun zu der F_{SO} „Reihenfolge bestimmen" das WM_{SO} „Reihenfolgebestimmung basierend auf dem Schließen von vergangenem Verhalten" inkl. eines Vorschlags für eine einzusetzende Methode, hier beispielsweise ein Fuzzy-Inferenzsystem, gefunden werden. Im nächsten Schritt werden die Wirkprinzipien, Entwurfsmuster und Wirkmuster zu einer Wirkstruktur zusammengesetzt und die generellen Prozesse des Systems sowie Selbstoptimierungsprozesse bestimmt. Auch in diesen Schritten ergeben sich Selbstoptimierungspotenziale. Es können z.B. alternative Elemente für das Erfüllen einer Funktion in unterschiedlichen Einsatzsituationen, Konfigurationsregeln und –prozesse sowie vom System einzuhaltende Restriktionen vorgesehen werden.

Zur Beschreibung der Prinziplösung s.o. Systeme wird eine semiformale **Spezifikationstechnik** entwickelt. Die Grundidee dieser Spezifikationstechnik basiert auf dem Modellierungsansatz für mechatronische Systeme [GEK01]. Die hier entwickelte Spezifikationstechnik geht jedoch weit über den genannten Ansatz und weitere bekannte Ansätze hinaus. Zum einen berücksichtigt sie für die Selbstoptimierung wichtige Aspekte wie Rekonfiguration, Kommunikation und Zielbestimmung. Zum anderen spezifiziert sie, wie sonst oftmals üblich, nicht nur die Wirkstruktur eines Systems. Zur umfassenden Spezifikation der Prinziplösung eines selbstoptimierenden Systems sind „sieben plus n" Partialmodelle notwendig (Bild 3). Sie entstehen nicht sequentiell in einer zwangsläufigen Reihenfolge, sondern im Wechselspiel. Am Ende der Konzipierung liegt ein kohärentes System von Partialmodellen vor. Diese Partialmodelle werden im Folgenden vorgestellt.

Anforderungen: Es handelt sich um die rechnerinterne Repräsentation der Anforderungen. Die Basis dafür bildet der Anforderungskatalog. Er stellt eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen (z.B. Baugröße, Leistungsdaten) an das zu entwickelnde Produkt dar. Es wird zwischen Wunsch-, Ziel- und Festforderungen unterschieden [PB03].

Umfeld: Dies Modell beschreibt das Umfeld des Systems und seine Einbettung in das Umfeld. Es werden die relevanten Einflussbereiche und mögliche Störgrößen identifiziert (z.B. Außentemperatur, mechanische Belastungen, übergeordnete Systeme). Aus der Kombination von Einflüssen ergeben sich Situationen, in denen das technische System funktionieren muss.

Zielsystem: Es handelt sich um die Repräsentation der Ziele und ihrer Verknüpfung. Wir unterscheiden zwischen externen Zielen (z.B. Vorgabe des Benutzers), inhärenten Zielen (Ziele zur Sicherung der Grundfunktionalität des Systems und natürliche Ziele des Systems wie Verschleißarmut) und internen Zielen (zum Optimierungszeitpunkt verwendete Ziele) [SFB04].

Funktionen: Hier handelt es sich um eine hierarchische Aufgliederung der Gebrauchsfunktionen [PB03]. Sie dient zur Ermittlung der grundsätzlichen Funktionalität des Systems. In einer Hierarchie wird die Hauptgebrauchsfunktion in mehrere Subfunktionen aufgeschlüsselt.

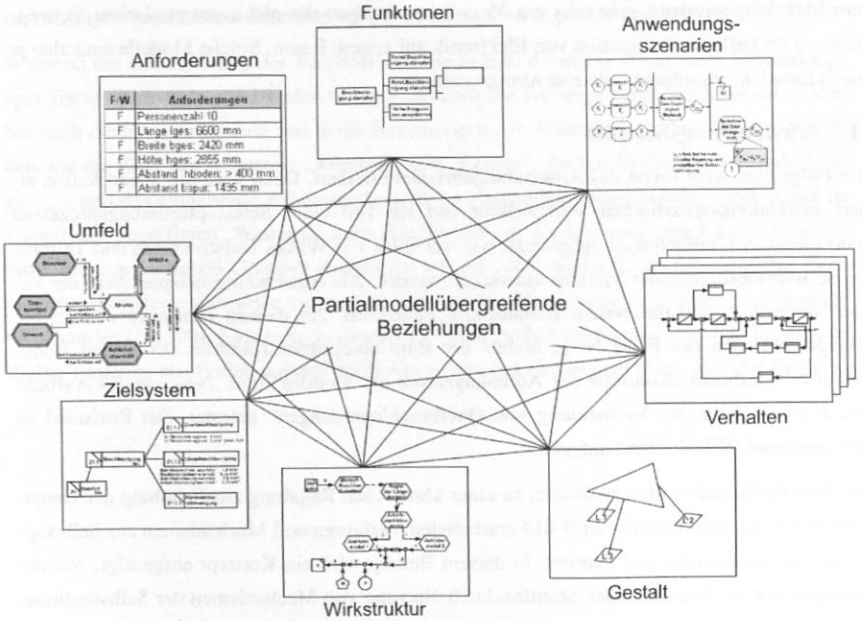


Abb.3: Kohärentes System von Partialmodellen zur Beschreibung der Prinziplösung eines selbstoptimierenden Systems

Wirkstruktur: In der Wirkstruktur werden die Wirkprinzipien, Entwurfsmuster und Wirkmuster repäsentierenden Systemelemente, deren Eigenschaften sowie die Beziehungen der Systemelemente zueinander abgebildet. Unter Beziehungen verstehen wir u.a. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse als auch Kommunikations- und Kooperationsbeziehungen.

Gestalt: Schon während der Konzipierung werden erste grobe Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und der Wirkorte des selbstoptimierenden Systems getroffen. Hieraus werden im weiteren Verlauf der Entwicklung konkrete Gestaltmodelle und unter zusätzlicher Berücksichtigung der Wirkstruktur die Baustruktur abgeleitet.

Anwendungsszenarien: Sie definieren für eine Situation welche Wirkstruktur aktiv ist, welche Optimierungsziele gelten und welcher Prozess in dem System abläuft bzw. ausgehend von einer Situation bei Auftreten eines Ereignisses den Ausgangs- und Endzustand des Systems (d.h. die anwendungsspezifische Wirkstruktur, Optimierungsziele und den generellen Prozess des Systems) sowie den Selbstoptimierungsprozess zur Erreichung des Endzustands.

Neben diesen sieben Partialmodellen können weitere Modelle zur Beschreibung des Gesamtsystems erforderlich sein, um insbesondere das Verhalten des zu entwickelnden Systems zu untersuchen und zu spezifizieren. Dies kann beispielsweise ein Kinematikmodell im Falle eines Mehrkörpersystems sein oder ein Modell zur Analyse der elektromagnetischen Verträglichkeit im Falle der Integration von Elektronik auf engem Raum. Solche Modelle sind also je nach Entwicklungsobjekt fallweise hinzuzunehmen.

4 Anwendungsbeispiel

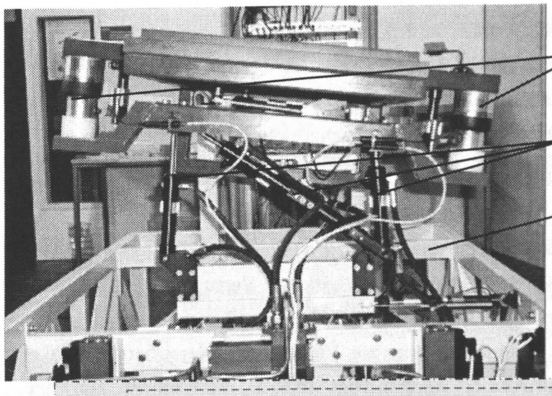
Im Folgenden wird zuerst das Anwendungsbeispiel erläutert. Dann wird die Spezifikation einer anwendungsspezifischen Wirkstruktur und ein Teil eines Selbstoptimierungsprozesses vorgestellt. Schließlich wird aufgezeigt, wie mit Hilfe von WM_{SO} Teilstrukturen und Teilprozesse selbstoptimierender Systeme entwickelt werden. Als Anwendungsbeispiel dient der Feder-Neige-Prüfstand der Neuen Bahntechnik Paderborn. An diesem Prüfstand werden die Hauptfunktionen des Feder-Neigemoduls der RailCab-Shuttles (Shuttles der Neuen Bahntechnik Paderborn) „Kontrolle der Aufbaudynamik der Shuttles“ und „Neigung des Aufbaus bei Kurvenfahrten zur Vermeidung von Querbeschleunigungen“ getestet. Der Prüfstand ist entsprechend (Bild 4, oben) aufgebaut.

An dem Prüfstand werden zusätzlich zu einer klassischen Regelung zur Erfüllung der Hauptfunktionen die innerhalb des SFB 614 erarbeiteten Verfahren und Mechanismen zur Selbstoptimierung angewendet und getestet. In diesem Beitrag wird ein Konzept aufgezeigt, wie der Komfort für die Insassen eines Shuttles durch Nutzung von Mechanismen der Selbstoptimierung und Erfahrungswissen verbessert werden kann. Der Komfort für die Insassen eines Shuttles hängt von dem Zustand des Gleisprofils ab, d.h. ändert sich dieses – dann entstehen Aufbaubewegungen und diese haben Auswirkungen auf den Komfort, vorausgesetzt, dass die Auswirkungen nicht kompensiert werden. Gleisprofiländerungen sind kaum zu verhindern, schon allein durch das über einen längeren Zeitraum wiederholte Befahren von Shuttles auf den Schienenabschnitten entstehen Änderungen im Gleisprofil. Die klassische Regelung verwendet zur Dämpfung der Aufbaubewegungen einen „Skyhook“-Ansatz, dieser orientiert sich an einer fest vorgegebenen Bahn, die bei der klassischen Regelung – einmal eingestellt – keine auftretenden Änderungen des Gleisprofils berücksichtigen kann.

Im Falle der Selbstoptimierung wird die fest vorgegebene Bahn durch eine mathematische Funktion abgebildet, deren Parameter im Betrieb abhängig vom jeweiligen Streckenprofil so variiert werden, dass der geforderte Komfort erzielt wird. Weiteren Einfluss auf die Regelgüte hat der eingestellte „Grad der Dämpfung“, mit der der Aufbau der Vorgabebahn nachgeführt wird. Die Parameterauswahl soll in diesem Fall auf Erfahrungswissen basieren. Dazu werden Informationen über Störungen in der Gleislage eines Streckenabschnitts, über gemachte Erfahrungen der Shuttles bzgl. einzustellender Parameter und des damit erzielten Komforts gesammelt und dem nächsten Shuttle zur Verfügung gestellt. Externe Ziele sind hoher Komfort

und niedrige Kosten. Eine hohe Lebensdauer und damit verbunden ein geringer Verschleiß sowie die Einhaltung von Begrenzungen (z.B. Zylinderausfahrwege) sind inhärente Ziele. Weiterhin müssen die Energievorgaben von dem Energiemanagementmodul des Shuttles berücksichtigt werden. Diese Situation wird am Prüfstand nachgestellt und getestet.

Während der Konzipierung des Prüfstands ist die in Bild 4 (unten) visualisierte anwendungsspezifische Wirkstruktur des Feder-Neige-Prüfstands für die vorgestellte Situation entstanden. Sie stellt die Systemelemente und deren Beziehungen dar. Weiterhin werden eingehende Größen wie die Ziele des Benutzers „Komfort" und „Kosten", die zur Verfügung stehende Energie $i_{verf.}$ und das eingehende Erfahrungswissen $i_{Erf.x}$ bezüglich „Vorgabebahn" und „Grad der Dämpfung" spezifiziert. Weiterhin kann das System zur Verbesserung der Übersichtlichkeit mit Hilfe von logischen Gruppen strukturiert werden. Hier sind z.B. die Elemente zur Regelung der Zylinderausfahrwege zu mechatronischen Funktionsmodulen (MFM) zusammengefasst worden [LKS00]. Elemente, in denen der für die Selbstoptimierung wichtige Prozess der Zielbestimmung stattfindet, werden durch einen Pfeil gekennzeichnet (hier: globaler Regler).



- Aufbaumasse über 2 Luftfedern an Aktoren gekoppelt
- 3 Hydraulikzylinder mit Ventilen zur Beeinflussung der Aufbaumasse
- Anregungsmodul bestehend aus 3 Hydraulikzylindern mit Ventilen zur Simulation von Gleisanregungen
- Hydraulikaggregat

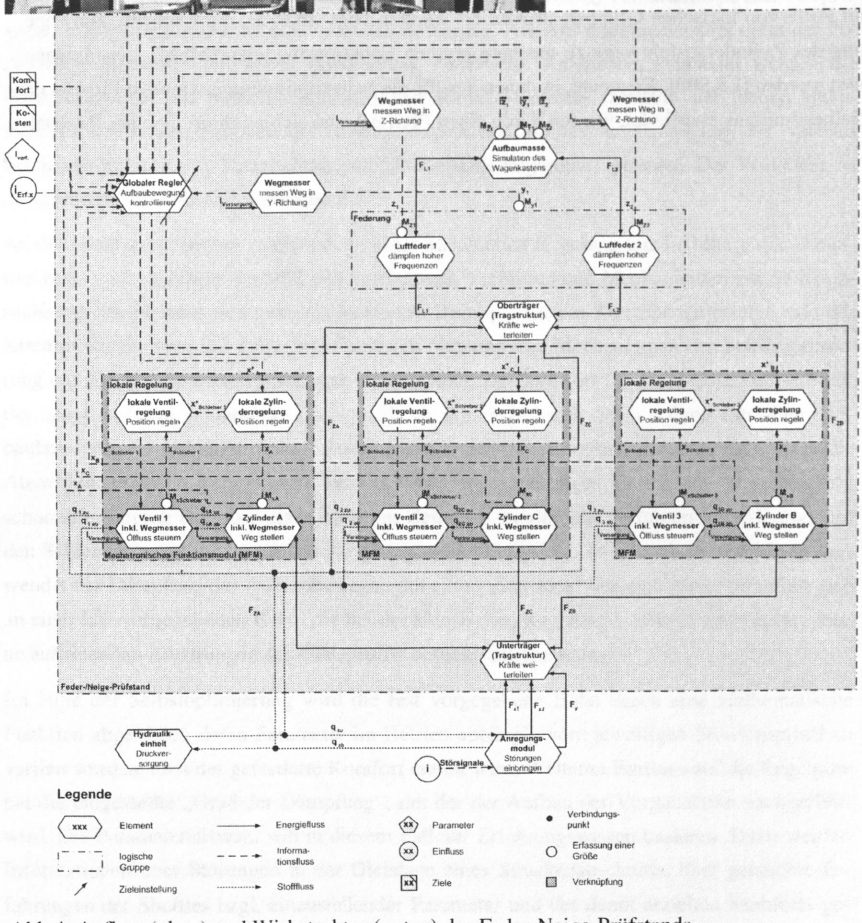


Abb.4: Aufbau (oben) und Wirkstruktur (unten) des Feder-Neige-Prüfstands

Ein Ausschnitt des Selbstoptimierungsprozesses ist in Bild 5 dargestellt. In der Situationsanalyse werden die Ziele des Benutzers erfasst, die Energievorgaben abgefragt, der Erfüllungsgrad des aktuellen Zielsystems analysiert und auf Erfahrungswissen zurückgegriffen. Diese Größen werden während der Zielbestimmung zum Festlegen eines neuen Zielsystems genutzt. In den nächsten Schritten werden die Vorgabebahn und das Dämpfungsmaß als Parametervorgabe für eine Verhaltensänderung berechnet und in den generellen Prozess des Feder-Neige-Prüfstands eingespeist. Hier findet dann die Verhaltensanpassung statt.

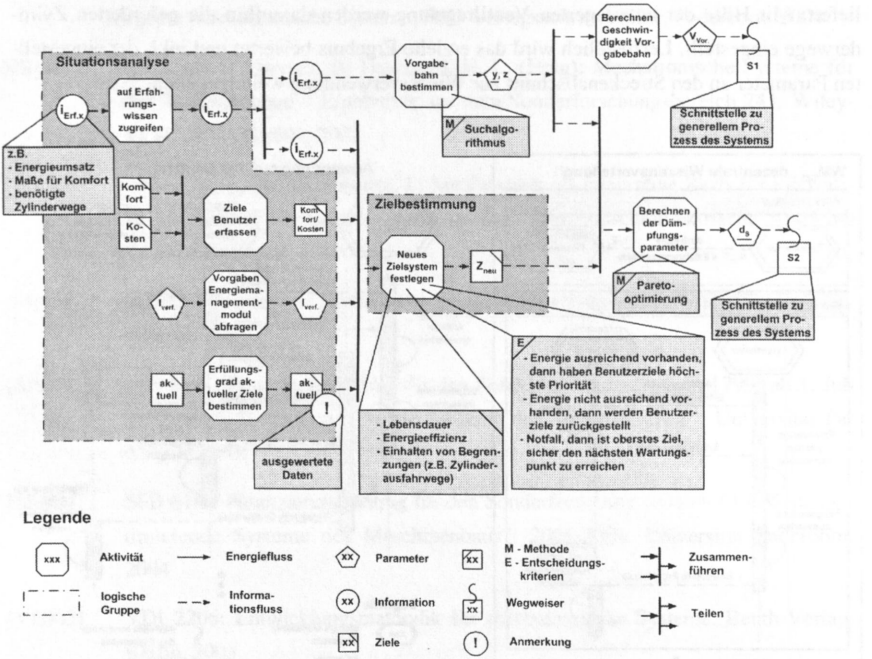


Abb.5: Ausschnitt aus dem Selbstoptimierungsprozess

Bisher wurde in der Wirkstruktur und den Prozessen angegeben, dass zur Bestimmung der Vorgabebahn und des Dämpfungsmaßes auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden soll. Es wurde jedoch nicht gezeigt, nach welchem Konzept dieses geschehen soll. Hier bieten die WM_{SO} Unterstützung. Aus einem Katalog von WM_{SO} kann z.B. zu der F_{SO} „Erfahrungswissen nutzen" und der Randbedingung dezentrale Wissensverteilung das WM_{SO} „dezentrale Wissensbereitstellung" ausgewählt werden (Bild 6 links). Es beschreibt u.a., dass das spezifische Wissen dezentral an relevante Stellen im System abgelegt wird. Weiterhin legt es fest, dass Teilnehmer des Systems gleichzeitig mit einer oder zwei Wissensbasen kommunizieren und Wissen abfragen sowie einstellen können.

Dieses WM_{SO} kann wie folgt auf das Beispiel übertragen werden (Bild 6 rechts). Die Shuttles sind die Teilnehmer des Systems. Ein oder mehrere Shuttles fragen den aktuellen und evtl. den folgenden Streckenabschnitt ab, anhand welcher Vorgaben die vorherigen Shuttles die besten Ergebnisse erzielt haben. Diese Informationen nutzen die Shuttles, und zwar der globale Regler des Feder-Neige-Moduls, zum Bestimmen der eigenen Vorgabebahn und eines geeigneten Dämpfungsmaßes. Die gewählten Vorgaben dienen als Führungsvorgaben für die eigentliche Shuttle-Regelung, die dann entsprechende Sollwerte für die Zylinderstellwege liefert. Mit Hilfe der unterlagerten Ventilregelung werden daraufhin die geforderten Zylinderwege eingestellt. Letztendlich wird das erzielte Ergebnis bewertet und inkl. der eingestellten Parameter an den Streckenabschnitt zur Wiederverwendung weitergegeben.

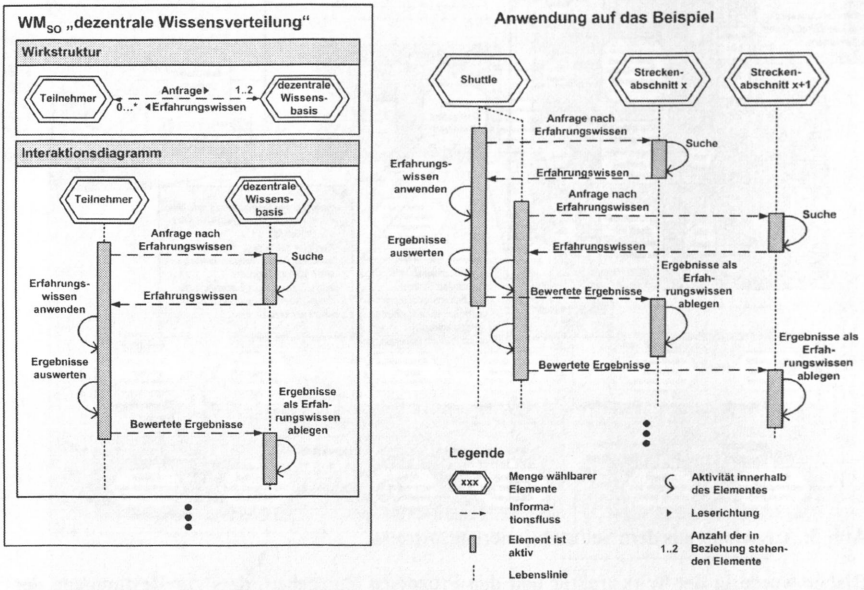


Abb.6: WM_{SO} „dezentrale Wissensbereitstellung" und Übertragung auf das Beispiel

Literatur

[GEK01] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, 2001

[GFS04] Gausemeier, J.; Frank, U.; Scheideler, P,; Schmidt, A.; Steffen, D.: Eine Entwurfsmethodik für selbstoptimierende Systeme. 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2004

[IBH02] Isermann, R.; Breuer, B; Hartnagel, H. L. (Hrsg): Mechatronische Systeme für den Maschinenbau – Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 241. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002

[LKS00] Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. VDI-Tagung: Mechatronik – Mechanische/Elektrische Antriebstechnik, Wiesloch, 2000

[PB03] Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003

[SFB01] SFB 614 - Einrichtungsantrag für den Sonderforschungsbereich 1799 (ab 1. Juli 2002: 614) "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus". Universität Paderborn, 2001

[SFB04] SFB 614 - Finanzierungsantrag für den Sonderforschungsbereich 614 "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus", 2005-2008. Universität Paderborn, 2004

[VDI03] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth-Verlag, Berlin, 2003

Anwendung von künstlicher Intelligenz zur schnellen Knochenmodell-Erkennung und -Rekonstruktion - Eine Studie

Stanley BAKSI, Ramona SCHWARZ, Frank ENGELMANN

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Abstract

Der Nachbau von anatomischen Körperteilen, zum Beispiel Knochen, als künstliche Implantate soll auf der Grundlage einer 3D-Digitalisierung erfolgen. Diese Implantate sind notwendig für einen teilweisen oder kompletten Austausch im Organismus. "Intelligente" Materialien und Implantate werden entwickelt und zukünftig besteht ein Bedarf an Rekonstruktionen basierend auf 3D-Abbildungen für präzise und schnelle Körperteil-Wiedergabe mit verschiedenen Rapid-Prototyping-Verfahren. Die 3D-Digitalisierung von biologischen Strukturen stellt aufgrund deren komplexen Struktur eine schwierige Aufgabe dar. Die heutigen Techniken zur Reproduktion setzten ein hohes Geschick in Umgang mit der Aufbereitungssoftware voraus. Dadurch werden Grenzen durch das Rekonstruktionstempo und die Anwendung der Technologie gesetzt. Ein Femur, der Oberschenkelknochen, besitzt gleiche strukturelle Eigenschaften unabhängig von der Abstammung und Größe des Menschens. Das trifft auch für alle anderen anatomischen Teile zu. Diese Ähnlichkeit erleichtert den Gebrauch von verschiedenen Eigenschaften der künstlichen Intelligenz zur Klassifikation und Vorhersage der 3D-Abbildung. Die Reproduktion bei der Anwendung künstlicher Intelligenz ist mit dem Stand der Technik beherrschbar. Die schwierige Aufgabe kann von "trainierten" PC-Programmen ausgeführt werden. Solche Programme werden in der Lage sein, Knochen schnell zu rekonstruieren. Sie können weiterhin zur Vorhersage von partiell zerstörten Strukturen im Schadensfall genutzt werden. Dieser Artikel präsentiert die gegenwärtigen Techniken und Technologien, die in der medizinischen Darstellung angewandt werden und schlägt eine Methode für die Integration von künstlicher Intelligenz zur schnellen Reproduktion von Knochenstrukturdarstellungen vor.

Keywords

Reverse Engineering, Künstliche Intelligenz, Knochenmodell-Erkennung, Rekonstruktion

1 Einleitung

Schadhafte Körperteile werden häufig durch künstliche Implantate ersetzt. Solche Implantate können von Herzklappen bis Knochensplitter und Hauttransplantationen reichen. Der Austausch von schadhaften und begrenzt funktionsgestörten Teilen ist für ein gesundes Leben wesentlich. Menschen haben eine höhere Lebenserwartung aufgrund der Fortschritte in der Medizin [1]. Jedoch bedeutet eine höhere Lebensdauer eine größere Abnutzung und einen größeren Verschleiß der Körperteile. Gewöhnlich ändert sich die Lebensdauer über Generationen und gibt damit der DNA zur Änderung und Anpassung an die längere Lebenszeit ausreichend Zeit. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Lebensdauer hat sich drastisch geändert. Sie ist gestiegen und die DNA konnte sich nicht ausreichend anpassen. Als ein Ergebnis kann angeführt werden: Menschen verbringen ein gesünderes Leben in der Jugend. Aber im hohen Alter ist die Gesundheit beeinträchtigt [2]. In vielen Fällen kommt es wegen den abgenutzten Körperteilen zu einer Verringerung der körperlichen Aktivitäten und eventuell zum geistigen Zerfall. Es besteht folglich eine Notwendigkeit mit künstlichen Köperteilen das Leben sinnvoll und angenehm zu gestalten. In Ergänzung der bisherigen Ausführungen sollen auch noch Unfälle und Unglücke mit betrachtet werden, die zu einer zusätzlichen Lebensbeeinträchtigung führen. Die Anzahl von Amputationen pro Jahr beträgt in Nordamerika 170.000. Davon waren im Jahr 2003 90% Beinamputationen [3].

Forschungsaktivitäten sind an verschiedenen Universitäten der ganzen Welt das Problem zu verzeichnen. Falls ein Knochenverlust ein Implantat verlangt, lässt der künstliche Ersatz normalerweise nur eine eingeschränkte Bewegung und/oder eine Gangart zu. Das ist der Regelfall, denn es ist schwer, ein anatomisch exaktes Teil in einer "originalen" Geometrie herzustellen, obwohl die Bearbeitungstechnologien in den letzten Jahrzehnten stark verbessert wurden. Eine exakte Nachbildung von anatomischen Teilen verlangt präzise 3D-Daten, welche weitgehend schwer zu erhalten gewesen sind. In den folgenden Abschnitten sollen die üblichen Verfahren für das Erreichen der 3D-Daten und die Anwendung von neuen mathematischen Techniken wie die künstliche Intelligenz für das schnelle Erstellen von angemessenen Designdaten der Ersatzteile (Implantate) gegeben werden.

2 Künstliche Intelligenz und seine Position im Produktentwicklungsprozess

Die Hauptattribute der Intelligenz sind das logische Denken, die Lernfähigkeit, die Anpassung, die Fehlertoleranz und die Selbstorganisation. Daten- und Informationsverarbeitungsparadigmen, die diese Attribute aufweisen, können als Mitglieder der Technikfamilie zu geteilt werden, die wissensbasiert das Gebiet Ingenieurwesen vervollständigen [4]. Der Vorteil wissensbasierter Systeme ist das Expertenwissen, das Fakten, Regeln, Heuristiken und Prozeduren verschlüsselt beinhaltet. Eine dieser Grundlagen ist die Fähigkeit des Wiedererkennens, der Objektidentifikation und des Schlussfolgerns auf verschiedene Ursachen und Effekte.

Künstliche Intelligenz kann weitgehend klassifiziert werden in:

a die Fähigkeit des Schlussfolgerns bzw. der logischen Argumentation, z.B. wahre und falsche Aussagen und Sätze, und

b die Fähigkeit des Wiedererkennens und des Klassifizierens, z.B. identische Objekte und /oder Formen.

Die logische Argumentation besitzt eine breite Anwendung, wie in den Bereichen der Entscheidungsfindung, der abgeleiteten Schlussfolgerung und der Methodiken [5]. Die Strukturerkennung und Klassifikation werden weitgehend in der Medizin zur Prognose und Diagnose genutzt [6]. Diese Entwicklung wird erleichtert durch die Eigenschaft von verschiedenen Krankheiten und Anomalien, bestimmten Formen/Mustern zu folgen. Weiterhin besitzen gleiche anatomische Komponenten eine ähnliche Form. Daraus folgt, dass die angeführten Prinzipien angewandt werden können, also dass diese die Strukturen der verschiedenen Körperteile studieren. Systeme können trainiert werden, um einen vorliegenden Fall wieder zu erkennen und vorherzusagen. Ziel ist es zu prüfen, ob die spezifische Datenstruktur ein Fall eines allgemeinen Musters ist und im Besonderen, ob die Eingangsdaten Werte für die Mustervariablen bieten. Im Bild 1 wird die schematische Funktion der Strukturklassifikation aufgezeigt.

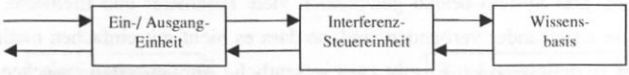


Abb. 1: Prozessstrategie der künstlichen Intelligenz

Bild 1 zeigt eine Eingang-Ausgang-Einheit, welche den Fall vom Sucher erhält. Der Fall kann in Form von segmentierten Fällen, wahrscheinlichen Werten oder präzisen Zahlenwerten vorliegen. Der Fall wird dann konvertiert in ein passendes Format der Interferenzsteuereinheit, die dann der "trainierten" Wissensbasis dargestellt werden kann, um eine Antwort zu extrahieren. Die Antwort ist dann in eine kompatible Form für den Sucher zurückzukonvertieren. Paradigmen des Wissensbasissystems, die zur Strukturerkennung und Klassifikation genutzt werden können, sind Künstliche Neurale Netzwerke, Evolutionäre Algorithmen und die Fuzzy-Logik.

Fuzzy-Logik: Diese Methode wurde zuerst von Zadeh entwickelt [7]. Sie liefert eine angenäherte aber effektive Möglichkeit der Verhaltensbeschreibung von Systemen, die zu kompliziert, fehlerhaft definiert oder nicht einfach zu analysieren sind. Die Idee ist, einen numerischen Prozentwert zur Unbestimmtheit zur Verfügung zu stellen, um dann diesen Wert zu nutzen, ein Objekt zu klassifizieren. Fuzzy-Logik verwendet geordnete Aussagen, anstatt solche Aussagen, die ausschließlich zutreffend oder falsch sind. Sie versucht die Faustregel einzubeziehen, die im Allgemeinen durch den Menschen zur Entscheidungsfindung genutzt wird. So liefert Fuzzy-Logik einen ungefähren aber wirkungsvollen Weg zur Beschreibung des Sys-

temverhaltens, das nicht einfach präzise zu beschreiben ist. Die schematische Funktion der Fuzzy-Technik ist in Bild 2 dargestellt. Genaue Daten werden zuerst aufgelockert. Dann ist ein Strukturvergleich durchzuführen, um zu sehen, ob das Objekt auf eine bestimmte Strukturart klassifiziert werden kann. Nach erfolgreicher Angleichung wird das Ergebnis ausgegeben, welches gewöhnlich eine definierte Antwort auf die Strukturklasse ist.

Abb. 2: Schritte der Fuzzy-Technik

Evolutionäre Algorithmen: Die Evolutionären Algorithmen sind eine Sammlung von Algorithmen basierend auf der Entwicklung einer Bevölkerung in Richtung einer bestimmten Problemlösung. Die Eingangsparameter werden dem System bereitgestellt, das diese nutzt, um die Ausgangsparameter abzuleiten. Im nächsten Schritt werden die gewünschten Eigenschaften der verschiedenen Eingangsparameter miteinander verbunden, um zu einer besseren Lösung zu gelangen [8].

Neurale Netzwerke: Neurale Netzwerke sind Systeme von linearen Gleichungen, die ähnlich einem menschlichen Gehirn funktionieren, das versucht das Systemverhalten aus seinen Unständen zu erlernen. Das System besitzt gewöhnlich viele Parameter und Elemente, die in komplizierter Weise miteinander verbunden sind, so dass es nicht mit einfachen mathematischen Gleichungen zu definieren ist. Es gibt zwei wesentliche Ähnlichkeiten zwischen biologischen und künstlichen neuralen Netzwerken. Die erste Ähnlichkeit besteht darin, dass die Baublöcke der beiden Netzwerke einfache rechnerische Bauteile sind, die in hohem Grade zusammengeschaltet werden. Die zweite Ähnlichkeit: die Verknüpfung der Neuronen ermittelt die Funktion des Netzes. Beide Netze verhalten sich ungefähr in der gleichen Weise [9]. Die schematische Arbeitsweise des neuralen Netzes wird in Bild 3 gezeigt. Das Netz besteht aus einer Gruppe von verknüpften Neuronen, von denen jedes ein bestimmtes Gewicht hat, das mit ihm verbunden ist. Das Netzwerk lernt einen einzelnen Ausgang an einen gegebenen Eingang anzupassen. Das Erlernen erfolgt durch Iteration, in dem das Gewicht der Neuronen iterativ justiert wird, bis die Ausgangsdaten an den Ausgangstandardsatz innerhalb akzeptabler Fehlergrenzen angepasst sind.

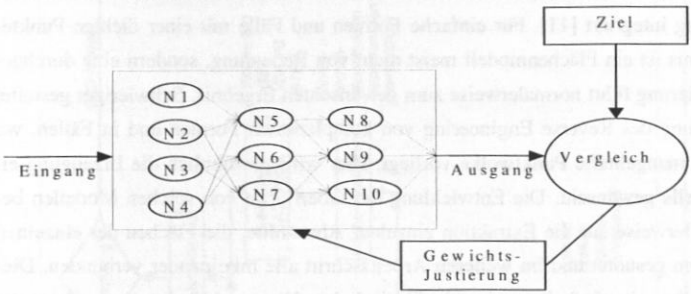


Abb. 3: Konzept des Neuralen Netzwerks

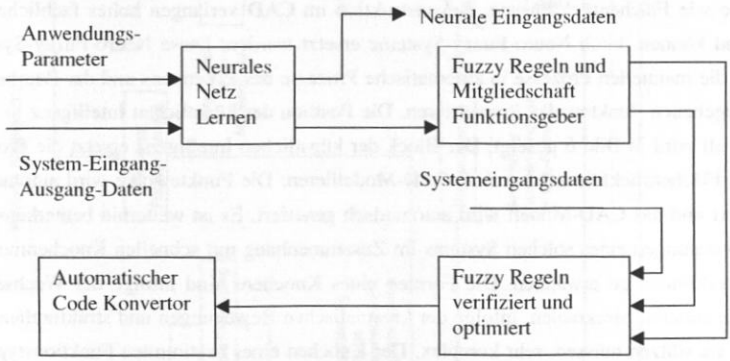


Abb. 4: Ein Fuzzy-Neurales System als Kombination eines Fuzzy-Systems und eines Neuralen Netzwerkes

Fuzzy-Neurale Systeme: Diese Systeme nutzen die Vorteile der Neuralen Netzwerke und der Fuzzy-Analogie. Der scharfe Ausgang vom Neuralen Netzwerk wird genommen und undeutlich / aufgelockert ausgeführt. Die Fuzzy-Daten können dann in eine Form eingelesen werden. Diese ist dann fuzzy-quantifiziert, wenn ein Ergebnis ausgegeben wird, dass dann als "scharfe" Daten in einem System genutzt werden kann, um weitere Prozesse durchzuführen. Dieser Prozess kann die quantifizierten Fuzzy-Daten zur Klassifizierung, Entscheidungsgrundlage oder Parameterextraktion nutzen. Bild 4 zeigt den typischen Prozess eines Fuzzy-Neuralen Systems. Die interpretierten Daten von Neuralen Netzwerken sind unscharf und die Energiefunktion ist durch Nutzung von Evolutionären Techniken minimiert [10].

Die Position der künstlichen Intelligenz im Reverse Engineering: Reverse Engineering und seine Position in dem Produktentwicklungsprozess werden in Bild 5 dargestellt. In dem Zyklus sind die 3D-Digitalisierung, die Oberflächenrückführung, die Verifizierung der Daten,

die Konstruktion im CAD, der Export des CAD-erstellten Flächenmodells und schließlich das Rapid Prototyping integriert [11]. Für einfache Formen und Fälle mit einer dichten Punktewolke als Ergebnis ist ein Flächenmodell meist nicht von Bedeutung, sondern eine durchgeführte Polygonisierung führt normalerweise zum gewünschten Ergebnis. Schwieriger gestaltet sich die Umsetzung des Reverse Engineering von komplizierten Formen und in Fällen, wo eine vorhandene mangelhafte Punktwolke vorliegt. Hier wird gewöhnlich die Erzeugung eines Flächenmodells gewünscht. Die Entwicklung der Oberfläche von solchen Modellen bezieht sich normalerweise auf die Extraktion einzelner Abschnitte, die Flächen der einzelnen Abschnitte werden gestaltet und im weiteren Arbeitsschritt alle miteinander verbunden. Dieser Prozess ist sehr zeitaufwändig und verlangt ein hohes Niveau. Mit der Anwendung der künstlichen Intelligenz können solche Schritte, die eine Oberflächenrekonstruktion (siehe Bild 5) nach sich ziehen, ersetzt werden.

Prozesse wie Flächenrückführung, Rekonstruktion im CAD verlangen hohes fachliches Niveau und können durch Neuro-Fuzzy-Systeme ersetzt werden. Diese Neuro-Fuzzy-Systeme können die manuellen Prozesse in automatische Prozesse des Erkennens und der Bearbeitung einer gegebenen Punktewolke konvertieren. Die Position der künstlichen Intelligenz in solch einem Fall wird in Bild 6 gezeigt. Der Block der künstlichen Intelligenz ersetzt die Prozesse von der Flächenrückführung bis zum CAD-Modellieren. Die Punktewolke wird automatisch analysiert und das CAD-Modell wird automatisch generiert. Es ist weiterhin bemerkenswert, die Anwendungen eines solchen Systems im Zusammenhang mit schnellen Knochenmuster - Rekonstruktionen zu erwähnen. Die Formen eines Knochens sind infolge der Wechselwirkung mit anderen Merkmalen, infolge der kinematischen Bewegungen und strukturellen Lasten, die sie stützen müssen, sehr komplex. Der Knochen eines bestimmten Funktionstyps behält seine repräsentative Form oder sein Erbgut oder seine Größe bei. Jedoch differiert er in einigen Werten der Formparameter. Dieses Merkmal erleichtert das Trainieren eines künstlichen Intelligenz-Systems an einem Standardreferenzmodell. Wenn dem System ein Muster-Knochen vorliegt, wird es in der Lage sein, die Schritte der CAD-Modellierung selbst auszuführen. Ein nochmals weiterentwickeltes System könnte auf Fehler zwischen der vorhandenen Punktwolke und dem erstellten Modell untersuchen. Es wird dann in der Lage sein, eine Korrektur durchzuführen, so dass noch ein besseres genaueres Ergebnis vorliegt. Das wird nicht nur den Reverse Engineering Prozess fördern, sondern es werden auch die Fertigkeit und der Intellekt positiv beeinflusst, indem diese auf radikale und nicht auf sich wiederholende Arbeiten konzentriert werden. Die folgenden Abschnitte untersuchen die verschiedenen Entwicklungen der medizinischen Abbildungstechnologien und wie die künstliche Intelligenz genutzt werden kann, um einen Knochen zu rekonstruieren.

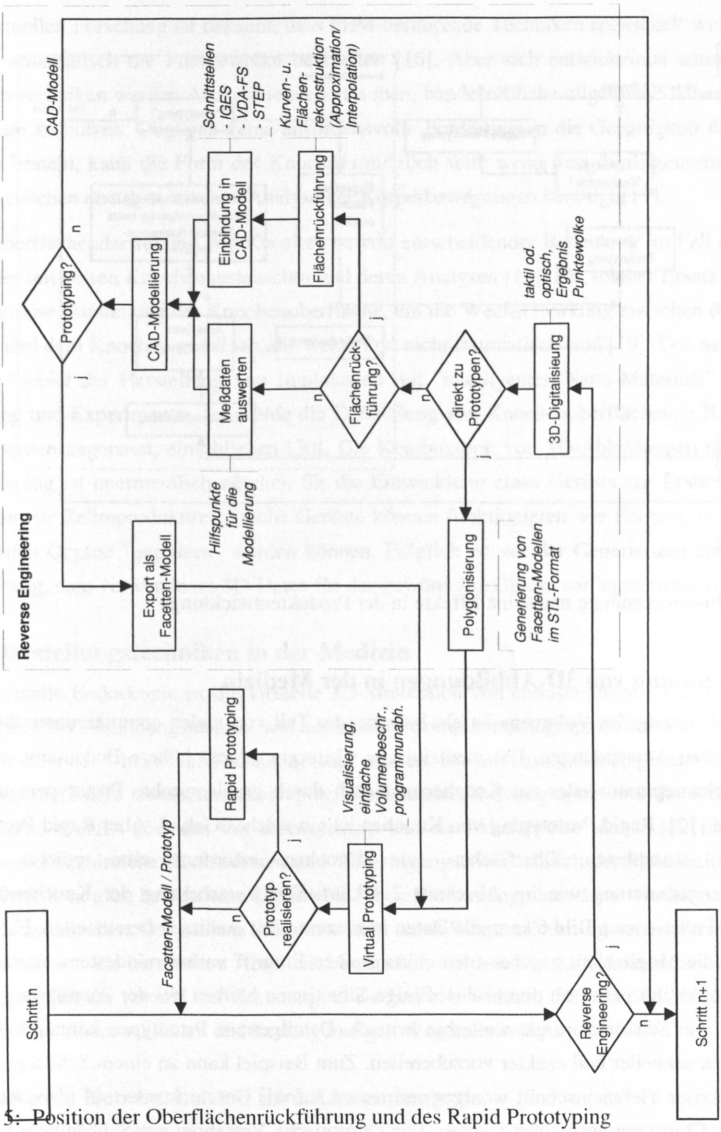


Abb. 5: Position der Oberflächenrückführung und des Rapid Prototyping im Reverse Engineering Prozess [11]

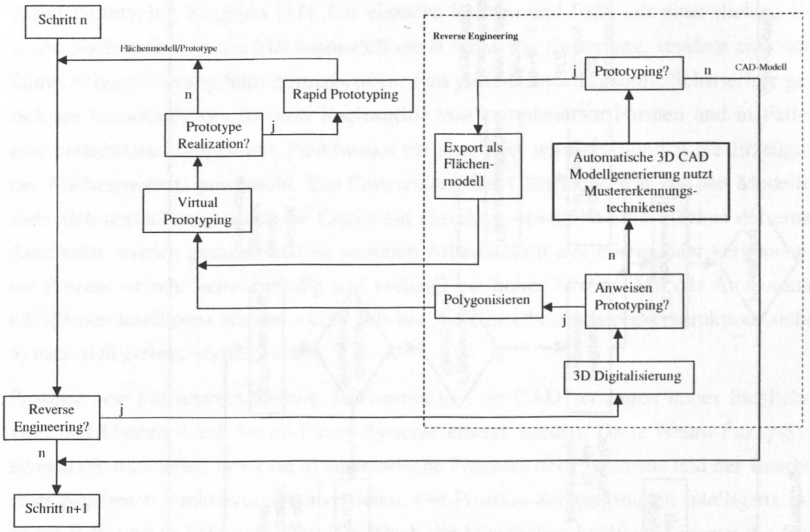


Abb. 6: Mustererkennung und seine Effekte in der Produktentwicklung

3 Anwendung von 3D-Abbildungen in der Medizin

Die Visualisierung des Volumens ist ein bedeutender Teil von vielen computerunterstützten medizinischen Anwendungen. Die medizinische Chirurgie erlangt höhere Bedeutung, wenn eine Knochenreparatur oder ein Knochenaustausch durch praxiserprobte Prototypen unterstützt wird [12]. Rapid Prototyping von Knochen ist ein solches Gebiet. Aber Rapid Prototyping von komplexen Oberflächen wie Knochen erfordern eine präzise 3D-Oberflächengenerierung wie im Abschnitt 2 erklärt. Die Verarbeitung der Knochendaten durch den Prozess nach Bild 6 kann die Daten in kürzerer Zeit qualitativ bereitstellen. Für den Arzt wird die Möglichkeit gegeben, den chirurgischen Eingriff vorher mindestens einmal zu üben, bevor er ihn praktisch durchführt. Einige Situationen bleiben bei der Ausführung von Verfahren wie Schädelchirurgie weiterhin kritisch. Detailgetreue Prototypen können helfen, Operationen schneller und exakter vorzubereiten. Zum Beispiel kann an einem Schädelprototyp ein präziser Tiefeneinschnitt weniger vertrauend auf das Geschick oder auf menschliche Fehler des Chirurgen ausgeführt werden. Für chirurgische Verfahren am Schädelbein ist es lebenswichtig, an einem Prototyp zu üben, da das Schläfenbeinhaus ein sehr empfindliches Organ zum Hören und der Balance ist sowie wichtige Nerven und Blutgefäße sowie die kleinen Gehörknöchelchen beinhaltet [13].

Eine genaue Oberfläche der Knochen ist zur Ausführung mechanischer Analysen, wie FEM, von Ermüdung oder Abnutzung und der Rissanalyse der Knochen notwendig [14, 15]. Aus

der aktuellen Forschung ist bekannt, dass FEM berührende Techniken entwickelt werden, die selbst automatisch die Punktewolke bearbeiten [16]. Aber sich entwickelnde automatische Flächentechniken werden Analysierenden erlauben, handelsübliche allgemeine Anwendungssoftware zu nutzen. Obgleich keine anspruchsvolle Forderung an die Genauigkeit der Oberfläche besteht, kann die Form des Knochens nützlich sein, wenn man die Eigenschaften zur kinematischen und dynamischen Analyse der Körperbewegungen benötigt [17].

Die Oberflächendarstellung von Knochen ist von entscheidender Bedeutung im Fall des totalen oder teilweisen Knochenaustausches und deren Analysen [18]. Ein solcher Ersatz benötigt eine präzise Darstellung der Knochenoberfläche, um die Wechselwirkung zwischen dem Implantat und dem Knochen zu bilden, die weich und nicht traumatisch sind [19]. Das neu entstehende Gebiet der Herstellung von Implantaten mit "intelligenten Nano-Materials" verlangt Planung und Experimente; das würde die Darstellung von Knochenoberflächen, z.B. an Einzelpatienten angepasst, einschließen [20]. Die Kombination von 3D-Abbildungen mit Rapid Prototyping ist unermesslich nützlich für die Entwicklung eines Gerüsts zur Erstellung von Formen zur Zellreproduktion. Solche Gerüste können funktionieren wie Formen, in welchen die neuen Organe "gegossen" werden können. Folglich ist vor der Generierung einer Form notwendig, dass verwendbare 3D-Daten für das gewünschte Objekt vorliegen müssen [21].

4 Darstellungstechniken in der Medizin

Die virtuelle Endoskopie ist die virtuelle 3D-Simulation von endoskopischen Daten, die von medizinischer Abbildungstechnik wie der axialen Computertomographie, der Kernspintomographie oder der Ultraschall-Technik erzeugt werden. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind die axiale Computertomographie, die Ultraschall-Sonographie und die Kernspintomographie. Details über das Verfahrensprinzip und die Arbeitsweise sind in [22] zu finden. Während es zahlreiche Kontroversen und Widerlegungen hinsichtlich der Sicherheit von solchen Praktiken gibt, besteht eine allgemeine Übereinstimmung, dass diese Verfahren zu hohe Kosten verursachen. Der nächste Abschnitt stellt einen Weg zur Nutzung von mathematischen Techniken vor, die im zweiten Abschnitt besprochen worden. Die Anwendung dieser Techniken verringert die Anzahl der Scannungen, die benötigt werden, um eine 3D-Abbildung des Objekts auf einem schnellen und kostengünstigen Weg zu erstellen.

5 Neurale Netzwerke und ihre Anwendungen

Für oben erwähnte Techniken werden benötigte Formdaten gesammelt. Jedoch setzen sie den Körper überhöhter Strahlung im Fall mehrerer Scannungen aus [23]. Deshalb ist das Ziel, die Belichtung und die Kosten zu reduzieren, indem nur einige Scannungen durchgeführt werden. Dehkordi und andere Autoren leiten die Definition der Kontur eines Oberschenkelknochens unter Anwendung von zwei orthogonalen Scannungen ab. Jedoch machen sie einige Vereinfachungen, so dass die oben angeführten Anforderungen nicht sicher gestellt sind. Weiterhin

dürfte der ganze Knochen in vielen Fällen wie bei schweren Körperverletzungen oder bei dezimierten Überresten nicht für eine Scannung zur Verfügung stehen. Durch Nutzung Neutraler Netzwerke, die auf die Regenerierung anatomische Teile wie Knochen trainiert sind, ist es möglich, Vorhersagen über die genauen Abbildungen der realen Knochenoberfläche zu tätigen. Solche Netze wurden von Csheng und anderen [24] gebaut, in denen 3D-orthogonale Neurale Netzwerke die Oberfläche eines schadhaften Knochens in der Schädel-Kinnbacken-Chirurgie vorhersagen. Wenn eine Datenbasis von Knochenoberflächen durch die Neuralen Netzwerke dargestellt würden, dann könnten die von der Datenbasis lernen. Post-Pädagogische Neurale Netzwerke können genutzt werden, um Knochenoberflächen, wie oben angeführt, vorher zu sagen. Jedoch ist die Generierung einer Datenbank zur Nutzung der Scannung realer Knochen nicht sehr attraktiv, infolge von logischen Schwierigkeiten der Handhabung solcher großen Mengen an realen Objekten und dann die schwierige Aufgabe, jedes einfache Modell zu scannen. Es ist deshalb bedeutsam, Knochenoberflächen als mathematische Ausdrücke zu definieren, z.B. beschreiben Arnold und andere in [25] einen Femur (der Oberschenkelknochen eines Menschens) genau. Die Knochenreferenzpunkte sind über 11 mathematische Parameter und die Form über 5 Parameter zu beschreiben. Diese Parameter können verschieden sein und verschiedene mathematische Abtasttechniken wie Latein Hybercubes [26] und MATLAB [27] nutzen. Die Knochen können in verschiedene Abschnitte unterteilt werden, so dass das Netzwerk die Kontur von den Abschnitten über die Parameter zur Oberfläche kommend abgleichen kann. Das Anpassen an den Originalknochen erfolgt genau. Diese Methode gibt präzise Parameter an das Interfacing Programm aus, welches dann vereinfacht, um ein Computermodell einer Knochenoberfläche auszugeben. Letztlich müssen die Knochenmusterregenerierungstechniken modifiziert werden, um gemeinsame verschiebbare unveränderliche Objekte (Knochen) unter Nutzung ähnlicher Methoden wie [28] zu regenerieren. Solche Methoden sind nützlich, falls es nicht möglich ist, einen Knochen in einer bestimmten Position zu scannen.

6 Diskussion

Die Stellung der künstlichen Intelligenz im Konstruktionsprozess im Allgemeinen und bei der Rekonstruktion von Knochen im Speziellen ist im Abschnitt 2 beschrieben. Der Rest des Artikels orientierte sich im Wesentlichen auf Neurale Netzwerke und ihre Nutzung zur Rekonstruktion von Knochenformen (Abschnitt 5). Ursache dafür ist, dass die Fuzzy-Logik und ihre Anwendungen ausgeprägter sind. Der Übergang, z.B. für die Klassifikation eines Knochens im Fall des Alters, ist nicht durch eine ausgeprägte Grenze gekennzeichnet und die sich ergebende Änderung ist nicht "binär" und es ergibt sich ein schrittweiser Fuzzy-Prozess [29]. Fuzzy-Logik kann auch zur Analyse von fossilen Knochenmustern genutzt werden [30]. In solchen Fällen ist das erste Ziel, die Merkmaltypen zu ermitteln, die durch Versteinerungen, z.B. ein Schädelstück, ein Oberkörper etc. dargestellt werden. Die Entscheidung kann dann ein

passendes Neurales Netzwerk unterstützen, welches die Form der fehlenden Verknüpfungen vorhersagen kann. Die Umkehrung des Falls ist auch möglich, wie in Abschnitt 2 besprochen, wenn ein Neurales Netzwerk ein fehlerbehaftetes Ergebnis ausgibt, kann die Fuzzy-Logik unter Nutzung der Daten eine Aussage treffen und dann mit Evolutionären Algorithmen weiterarbeiten, um Fehler zu reduzieren. Die Fuzzy-Logik ist ein Randbereich des Reverse Engineering Prozesses, wie im Bild 7 dargestellt.

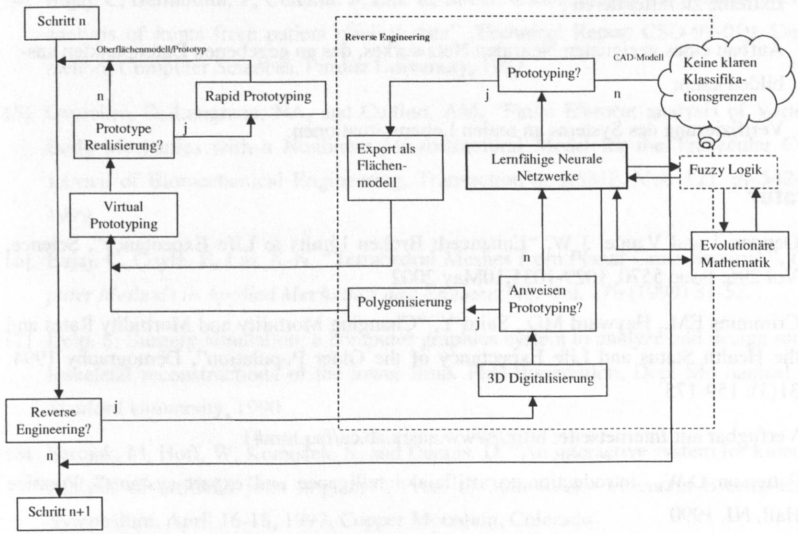


Abb. 6 Die Rolle der Fuzzy-Logik im Reverse Engineering Prozess

Die Anwendungen der 3D-Visualisierung in der medizinischen Bildverarbeitung drängen auf den Bedarf des schnellen Regenerierens von 3D-Modellen. Diese 3D-Modelle bilden eine Plattform zur Arbeit für den Analysator. Herkömmliche Digitalisiertechniken bestrahlen den Körper mit einer hohen Dosis. Infolgedessen musste eine optimale Lösung gefunden werden, bei der das gewünschte 3D-Modell unter Anwendung weniger Scann-Vorgänge erzeugt wird. Durch Nutzung Neuraler Netzwerke erhält man Parameter und ein 3D-Modell bei weniger ausgeführten Scann-Vorgängen. Obwohl Tseng u.a. [24] den Schädel unter Anwendung eines orthogonalen Neuralen Netzwerks ausbildeten, gibt es kein Modell, welches die Oberfläche mit Hilfe von 2 Scannungen siehe Dehkordi u.a. [23] vorhersagen kann.

Daher wird die zukünftige Arbeit auf folgenden Gebieten zu erwarten sein:

a) Definition eines parametrischen Knochenmodells (vorzugsweise ein Oberschenkelknochen - Femur);

b) Definieren von Segmenteile des Knochens, um eine beschreibende Oberfläche mit Hilfe von Regenerierungstechnik-Vorlagen zu erhalten;

c) Definieren einer geeigneten Fehlstellen-Auswahl, um die unterschiedlichen Fälle und Extreme zu reflektieren ;

d) Aufbau eines geeigneten Neuralen Netzwerkes, das an gegebenen Datenpunkten ausbilden kann;

e) Verifizierung des Systems an realen Lebenssituationen.

Literatur

[1] Oeppen J and Vaupel J W, "Enhanced: Broken Limits to Life Expectancy", Science, Vol 296, Issue 5570, 1029-1031,10May 2002

[2] Crimmins EM., Hayward MD., Saito Y, "Changing Mortality and Morbidity Rates and the Health Status and Life Expectancy of the Older Population", Demography 1994; 31(3): 159-175

[3] Verfügbar auf Internetseite: http://www.aasra.ab.ca/faq.htm#1

[4] Patterson D.W, "Introduction to artificial intelligence and expert systems", Prentice Hall, NJ, 1990

[5] Kimura. I, "Product Development with Mathematical Modeling, Rapid Prototyping and Virtual Prototyping (Fortschritte in Der Maschinenkonstruktion S. Ph.D thesis)", Springer Verlag

[6] Nilsson N.J, "Principles of artificial intelligence" Tioga Pub. CA & Springer Verlag.

[7] Zadeh. L.H, "Fuzzy logic", IEEE Computer, 1988 pp. 83-89

[8] Mitchell .M, "An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems)" The MIT Press, MA 02142

[9] Hagan M.T, Demuth, HB and Beale M, "Neural Network Design", PWS Publishing Company, Boston, MA

[10] Jain L. C, "Fusion of neural networks, fuzzy sets, and genetic algorithms : industrial applications", - Boca Raton, Fla. [u.a.] : CRC Press, 1999

[11] Beyer C. „Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten, Ph.D thesis", October 2002, Shaker Verlag

[12] Y. Choi, J. Leong, W. Lu, W. Wang , "VISBONE: 3D Visualization of Bone Mineral Density", The Seventh Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, October 05 - 07, 1999 Seoul, Korea

[13] Qiu ming-guo, Zhang Shao-Xiang, Liu Zheng-Jin, Tan Li-wen, Wang Yu-su, Deng Junhui, Tang ze-sheng, "Digitized model of the temporal bone", International Workshop on Visible Human Jan. 19-22, 2003 Chongqing, China

[14] Bajaj. C, Bernardini. F, Cutchin. S, Lin. K, Sacks. E and Schikore. D, "Comprehensive analysis of joints from patient clinical data" ,Technical Report CSD-97-019, Department of Computer Sciences, Purdue University, 1997.

[15] Overaker, D, Langrana, NA, and Cuitino, AM, "Finite Element analysis of Vertebral Body Mechanics with a Nonlinear Microstructural Model for the Trabecular Core", Journal of Biomechanical Engineering, Transaction of ASME, Vol. 121, pp.542-550, 1999.

[16] Bajaj. C, Coyle. E, Lin. K-N, "Tetrahedral Meshes from Planar Cross Sections", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 179 (1999) 31-52.

[17] Delp. S: Surgery simulation: a computer graphics system to analyze and design musculoskeletal reconstructions of the lower limb. PhD dissertation, Dept Mechanical Eng, Stanford University, 1990

[18] Sarojak. M, Hoff. W, Komistek. R, and Dennis. D, "An interactive system for kinematic analysis of artificial joint implants", Proc. of 36th Rocky Mountain Bioengineering Symposium, April 16-18, 1999, Copper Mountain, Colorado

[19] "Ankle replacement, Clinical trial extended for STAR ankle replacement device", Mayo Clinic Checkup Newsletter, July 2003 (Vol. 10, No. 2), available at : http://www.mayoclinic.org/checkup-2003/july-ankle.html

[20] Salata O.V., "Applications of nanoparticles in biology and medicine" Journal of nanobiotechnology, Vol. 2, April 30 2004

[21] Hutmacher DW, Ng KW, Kaps C, Sittinger M, Klaring S, "Elastic cartilage engineering using novel scaffold architectures in combination with a biomimetic cell carrier", Biomaterials. 2003 Nov;24

[22] Cho. Z. H, Jones. J. P, Singh, M.," Foundations of Medical Imaging", John Wiley and Sons. Inc

[23] Nikkhahe-Dehkordi, B., Bro-Nielsen, M., Darvann, T., Gramkow, C., Egund, N., Hermann, K. "3D Reconstruction of the Femoral Bone using two X-Ray Images from Orthogonal Views. In Lemke, H.U., Vannier, M.W., Inamura, K., Farman, A.G. (eds.): Computer Assisted Radiolody (CAR'96)". Springer-Verlag. p. 1066-1068, 1996.

[24] Hsu. J and Tseng. C, "Application of three-dimensional orthogonal neural network to craniomaxillary reconstruction", Computerized Medical Imaging and Graphics, Volume 25, Issue 6 , November-December 2001, Pages 477-482

[25] Arnold, A.S., Blemker, S.S., and Delp, S.L, "Evaluation of a Deformable Musculoskeletal Model: Application to Planning Muscle-Tendon Surgeries for Crouch Gait", Annals of Biomedical Engineering, vol. 29, pp. 1-11, 2001.

[26] Cochran W. G, "Sampling Techniques (Probability & Mathematical Statistics S.)", Wiley, NY, 1977

[27] Mehr Informationen unter: www.matlab.com

[28] Chan. L, "Neural Networks for Collective Translational Invariant Object Recognition: Neural Networks in Vision and Pattern Recognition", Series in Machine Perception and artificial intelligence, Volume 3, World Scientific.

[29] Pietka E, "Computer-assisted bone age assessment based on features automatically extracted from a hand radiograph", Computerized Medical Imaging and Graphics, Volume 19, Issue 3, May-June 1995, Pages 251-259

[30] Verfügbar auf Internetseite:
http://www.mc.maricopa.edu/dept/d10/asb/anthro2003/origins/willermet/fuzzysets.html

Virtuelle Visualisierung und Modellierung von Schädelknochen anhand von CT-Daten

Ralph STELZER, Andreas KOSSLER, Mathias FUNKE,
Uwe ECKELT, Matthias SCHNEIDER

Technische Universität Dresden

Abstract

Die navigationsgestützte Operationsplanung basiert weltweit auf der 2-dimensionalen Bearbeitung von Computertomografie-Daten. Für bestimmte medizinische Gebiete (z.B. Neurochirurgie) ist dieser Stand völlig ausreichend, weil z.B. bei der Lokalisation von Gehirntumoren lediglich die Position und Größe eine Rolle spielt. In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, die vor allem auch ästhetische Gesichtspunkte berücksichtigen muss, ist diese Operationsplanung nicht ausreichend, um mit hoher Wahrscheinlichkeit ein sehr gutes Operationsergebnis zu erzielen. Die bisher verwendete Software beinhaltet eine quasi-3D-Visualisierung aber keine 3D-Segmentierung, die die Voraussetzung für eine Fragmentpositionierung bildet.

Durch den Einsatz eines CAD-Systems aus dem Ingenieurbereich (z.B. CATIA) wird dieses Defizit beseitigt. Aus den Computertomografie-Daten wird ein Modell des Schädels oder von Teilen des Schädels automatisch generiert. Auf der Basis dieses Modells erfolgt die Segmentierung von Knochenfragmenten. Dieses CAD-Modell kann mit den vorhandenen Softwarewerkzeugen beliebig modifiziert werden. Es können Bohrungen für Befestigungselemente oder Metallplatten zur Fixierung von Knochenfragmenten eingebracht werden. Darüber hinaus ist auch die Modellierung und Positionierung von Implantaten möglich, wenn aufgrund von Tumoren oder schweren Verletzungen Knochenteile fehlen. Durch die Übertragung des CAD-Modells in eine virtual Reality Umgebung wird in Zukunft der Chirurg die Operationsplanung an einem virtuellen 3D-Modell im Raum vornehmen können.

Keywords

Operationsplanung, Operationsnavigation, CT/MRT-Daten, CAD-System, VR-Anwendung

1 Stand der Forschung in der Operationsplanung und Navigationstechnologie

Computerbasierte quasi-3-dimensionale Visualisierungstechniken auf 2-dimensionalen Bildschirmen haben im letzten Jahrzehnt Einzug in die Medizin gehalten. Dies ist auf die ständig wachsende Bedeutung und Weiterentwicklung der bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie (CT) und der Magnetresonanztomographie (MRT) zurückzuführen. Die immer leistungsfähigere Computertechnik schafft zudem die Möglichkeit, die große Menge anfallender Daten in kurzer Zeit zu verarbeiten.

Ein wesentliches Einsatzgebiet für Computersysteme in der Chirurgie ist die Planung und Simulation von Operationen. Die mit Hilfe eines bildgebenden Verfahrens gewonnenen Daten können mit Bildverarbeitungsroutinen bearbeitet werden und dienen Medizinern in verschieden Einsatzgebieten zur Diagnose und Therapie. Neben der Operationsplanung werden diese Techniken vor allem auch in der Bestrahlungsplanung eingesetzt. Operationen am Gesichtschädel, wie die Wiederherstellung von schweren Gesichtschädelfrakturen oder die Korrektur von angeborenen Missbildungen, erfordern aufgrund ihrer Komplexität eine besonders sorgfältige und kreative Planungstechnik. Angestrebt werden dabei eine Wiederherstellung der Funktion sowie eine Verbesserung des eben so wichtigen äußeren Erscheinungsbildes des Gesichtes. Bisher wurden diese Planungen konventionell mit Hilfe von Gipsmodellen, Röntgenbildern, Photographien und cephalometrischen Analysen durchgeführt [1]. Seit mehreren Jahren stehen zur Operationsplanung CT- und/oder MRT-Daten zur Verfügung. Die CT- und MRT-Scanner sind mit einer Visualisierungs- und Nachbereitungssoftware ausgerüstet. Mittels dieser Software können die Daten quasi-3-dimensional visualisiert sowie über Schwellwerte das Hartgewebe vom Weichgewebe getrennt werden. Die verarbeiteten Datensätze können im Dicom-Format in Navigationssysteme eingelesen werden und erlauben dem Operateur eine intraoperative Orientierung am präoperativen Datensatz. Darüber hinaus können die Dicom-Daten mit kommerziellen Softwaresystemen (z.B. Mimics) in ein STL-Format konvertiert und daraus ein Stereolithografiemodell erstellt werden [2]. Diese physischen Modelle werden ebenfalls zur Operationsplanung eingesetzt. An diesen Modellen ist aber keine interaktive Modifikation möglich. Die Software für die Operationsplanung und Navigation erlaubt eine multiplanare Rekonstruktion (Abbildung 1) in den Standard-Ebenen (coronal, sagittal und axial). In diesen Ebenen können Bereiche (z.B. Tumore, Knochenfragmente) markiert und segmentiert werden [3,4]. Diese Segmentierung ist nur schichtweise möglich, wobei kein Zusammenhang zwischen den Schichten besteht. Die quasi-3-dimensionale Visualisierung [5] dient nur einer zusätzlichen Veranschaulichung. Diese Segmentierung erfordert ein hohes Expertenwissen vom Chirurgen. Eine gezielte Veränderung der Daten, beispielsweise zur Vorschau auf ein späteres Operationsergebnis, ist bisher nicht möglich. Dieses Defizit ist besonders im Gesichtsbereich gravierend, wo neben funktionellen besonders ästhetische Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle spielen.

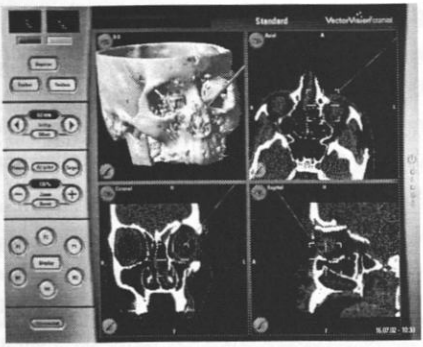


Abb. 1: Darstellung der CT-Daten in einem Operationsplanungssystem (Software Brainlab)

Auf dem Gebiet der Operationsnavigation gibt es ein Projekt | 6 |, das durch Einsatz erweiterter Realität die Operation unterstützt. Die Operationsplanung erfolgt aber weiterhin am 2-dimensionalen Bildschirm.

2 Schaffung einer Planungsumgebung zur virtuellen Operationssimulation

Um die Anforderungen der Chirurgen an eine virtuelle Planungsumgebung zur Operationssimulation erfüllen zu können, kommt der Einsatz leistungsfähiger CAD-Systeme (z.B. CATIA V5) aus dem Ingenieurbereich in Frage. Diese CAD-Systeme sind grundsätzlich dreiminensional ausgerichtet, weil in diesem Bereich das Design eine dominierende Rolle spielt. Damit sind sie den medizinischen Softwaresystemen, die auf der Basis der schichtweisen 2-dimensionalen Abbildung der Computertomografen basieren, überlegen. Dabei ist es naheliegend, die notwendigen virtuellen Veränderungen nicht mehr nach mühsamer Segmentation in der Einzelschicht, sondern unmittelbar am 3-dimensionalen Modell vorzunehmen. Im CAD-System können z.B. Knochenfragmente, die durch eine Fraktur entstanden sind, zielgerichtet segmentiert und an den richtigen Ort positioniert werden. Die weitere Planung ermöglicht dann Befestigungselemente für Knochenfragmente (Schrauben) bereits präoperativ zu planen. Nach exakter virtueller Rekonstruktion des Gesichtschädels können diese Schrauben in korrekter Dimension, Richtung und Länge bereits am Bildschirm „eingebracht" werden, ohne dass wichtige Strukturen, wie z.B. Nervenbahnen, verletzt werden oder die Schraube an einem falschen Ort aus dem Knochen herausragt.

In dem folgenden Abschnitt werden die Verfahrensweisen dargestellt wie aus den CT- oder MRT-Daten ein weiterverarbeitbares CAD-Modell des Schädels entsteht.

3 Modellierung des menschlichen Schädels mit CATIA

Ausgangspunkt für ein individuelles Modell eines Schädels ist eine CT-Aufnahme, die man vom Patienten erstellt. Diese CT-Daten werden dann über eine noch festzulegende Schnittstelle in das CAD-System überführt. Zurzeit wird als Datenaustauschformat das STL-Format benutzt, da es bisher noch keine direkte Möglichkeit gibt, Daten aus einem CT-Datensatz, die im DICOM Format vorliegen, in ein CAD-System zu importieren.

Um die Schädelknochen in CAD-System als 3D Modell abzubilden, gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Wege.

Der erste Weg ist, einen Prototyp eines menschlichen Schädels zu modellieren und diesen Prototyp über die Parameter des CAD-System so zu verändern, dass das Modell an die individuellen anatomischen Merkmale des jeweiligen Patienten angepasst werden kann. Schwierig bei diesem Ansatz ist, dass die Anatomie der Gesichtsschädelknochen individuell große Unterschiede aufweist und somit die Festlegung geeigneter Parameter schwierig ist. Man kann zwar ein CAD-Modell anhand eines physisch vorhandenen anatomischen Modells erzeugen, die Qualität und die Detailtreue eines solchen Modells wird von Ärzten aber als unzureichend für die Operationsplanung eingeschätzt.

Ein anderer Ansatz ist es, aufgrund einer CT-Aufnahme eines Patienten eine weitgehend automatisierte Modellierung vornehmen zu lassen und somit ein individuelles Modell des jeweiligen Schädels zu bekommen. Bei der Modellierung der Schädelknochen im CAD-System wurden sowohl der erste Ansatz als auch der zweite getestet.

Die bisher bekannten und in der Praxis angewendeten Verfahren zur Flächenrückführung [7] sind für die Lösung des aufgezeigten Problems ungeeignet.

Insgesamt wurden bisher drei unterschiedliche Verfahren, die die Softwarewerkzeuge des CAD-Systems CATIA bieten, getestet, um aus den CT-Daten ein Modell des menschlichen Schädels zu erstellen:

1. Modellierung der Flächen durch Erzeugung eines parametrischen Drahtnetzes und Schließen der Maschen mit Flächen aus der Umgebung „Generative Shape Design"
2. Flächenrekonstruktion mit der Funktion „Power Fit" aus der Umgebung „Quick Surface Reconstruction"
3. Modellierung eines Volumenkörpers durch das Zusammensetzen von Schichten aus der Umgebung „Part Design"

Modellierung der Flächen durch Erzeugung eines parametrischen Drahtnetzes

Bei der ersten getesteten Variante werden auf ein beliebiges STL-Flächennetz 3D-Kurven aufgezeichnet, die ein Netz auf der Oberfläche der STL-Fläche bilden. Diese 3D-Kurven sind 3-dimensionale Splines, die durch Stützstellen definiert sind. Die Genauigkeit dieser Kurven, im Vergleich zur STL-Fläche, steigt proportional mit der Anzahl der Stützstellen einer Kurve. Ebenso werden Details des Schädels besser abgebildet, wenn die Dichte der Kurven sehr hoch ist. Die Abweichung der einzelnen Kurven zur STL-Fläche ist jederzeit kontrollierbar. Das so entstehende 3-dimensionale Netz, ist jederzeit durch die Bearbeitung einzelner oder mehrerer Stützstellen editierbar. Es entsteht eine Art Drahtgitter, das um die Formen des Schädels gebogen ist. Dabei können die Stützstellen des Kurvennetzes nicht nur intern in CATIA selbst editiert werden, sondern auch mit externen Programmen. Somit ist es möglich, das einmal erstellte Drahtgitter durch Vergleich von Parametern an eine andere topologisch gleiche Schädelform anzupassen.

Im zweiten Schritt gilt es die Maschen des Netzes mit Flächen zu füllen, so dass am Ende ein geschlossener Flächenverbund entsteht, der einen Volumenkörper eindeutig beschreibt. Dabei werden die Einzelflächen in den Maschen so verbunden, dass tangentiale Flächenübergänge entstehen, so dass eine gute Oberfläche entsteht und am Ende der Modellierung von der Netzstruktur nichts mehr zu sehen ist. Wenn die Maschen des Netzes komplett gefüllt sind und der Flächenverbund so zu sagen „wasserdicht" ist, kann man den Flächenverbund in einen Volumenkörper umwandeln. Dann stehen dem Nutzer alle Bearbeitungsmöglichkeiten zur Verfügung, die CATIA für die Volumenbearbeitung anbietet.

Abb. 2: Kurvennetz von einem Teil des Unterkiefers

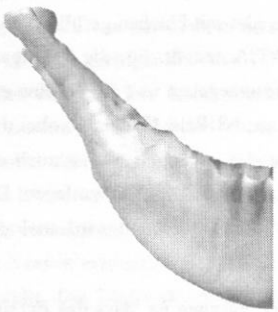


Abb.3: resultierende Fläche

Vorteil dieser Modellierungsvariante ist, dass wenn einmal ein Prototyp des Schädels erstellt worden ist, dieser Prototyp durch Veränderung der Parameter an eine individuelle Schädelform angepasst werden kann. Dies funktioniert aber nur, wenn die einzelnen Schädel die glei-

che Topologie haben. Schon bei Knochenfrakturen ist dies nicht mehr der Fall. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich eine sehr gute Qualität der Oberfläche ergibt. Diese hängt aber sehr stark von der Struktur des Kurvennetzes ab. Verläuft das Kurvennetz harmonisch, erhält man sehr gute Flächen. Dadurch, dass die einzelnen Flächen, die die Maschen des Netzes füllen, von den Parametern des Kurvennetzes abhängen, kann man einzelne Flächen weder löschen noch anderweitig editieren. Eine Veränderung einer einzelnen Fläche hätte immer auch eine Veränderung anderer Flächen zur Folge. Dies ist als Nachteil zu sehen.

Flächenrekonstruktion mit der Funktion „Power Fit"

Eine zweite Möglichkeit, einen Volumenkörper aus einer STL-Fläche zu erstellen, ist die Benutzung des Moduls „Quick Surface Reconstruction". Dieses Modul ist zur schnellen Flächenrückführung digitalisierter Daten vorhanden. Eine solche Flächenrückführung kann später nur schwer parametrisiert werden und ist somit ein Verfahren, das für jeden individuellen Schädel gemacht werden müsste.

Am Anfang steht wieder die Erzeugung eines Kurvennetzes. Diesmal werden keine 3D-Kurven erstellt, sondern es entstehen Kurven durch planares Schneiden der STL-Fläche. Führt man diese Schnitte in zwei oder mehreren Richtungen durch, so entsteht wieder ein Kurvennetz. Für die Erzeugung solcher Kurven gibt es in CATIA eine eigene Funktion, die nur die Anzahl, die Richtung und den Abstand der Schnitte als Parameter benötigt, um solche Kurven zu erstellen. Anders als bei dem Kurvennetz aus den 3D-Kurven, wo sich an den Knotenpunkten des Netzes die Kurven scheiden, ist dies hier nicht der Fall. Bedingt durch die Glättung der Kurven und somit entstehenden Abweichungen von der STL-Fläche kann ein Schneiden der Kurven an den Knotenpunkten nicht vorausgesetzt werden. Die einzelnen Maschen dieses Netzes werden wieder mit Flächen gefüllt. Allerdings werden diese Flächen mit einer Spezialfunktion von CATIA erstellt. Für die Erzeugung dieser Flächen wird die Umrandung einer einzelnen Masche angegeben und daraus eine entsprechende Fläche berechnet. Es entsteht ein Flächenverbund aus NURBS Flächen, wobei die einzelnen Flächen weiter editierbar sind, da sie nicht voneinander abhängen. Es ist auch möglich, die einzelnen Flächen zwischen den Maschen direkt auf die STL-Fläche zu legen. Das setzt aber einen absolut sauberen STL-File voraus. Aus dem Flächenverbund wird analog zur ersten Variante wieder ein Volumen erzeugt.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass das Erzeugen des Kurvennetzes und das anschließende Füllen der Maschen relativ schnell und einfach zu realisieren ist. Aufgrund der fehlenden Parametrik wird wesentlich weniger Rechenleistung beansprucht als bei der ersten Variante. Die Flächenqualität ist dabei gleich gut. Eine Erstellung eines Modells ist an keine feste Topologie gebunden, daher sind z.B. Frakturen auch einfach in das Modell zu implementieren. Ein weiterer Vorteil gegenüber der ersten Variante ist, dass sich dieses Verfahren zum großen Teil automatisieren lässt.

Ein gemeinsamer Vorteil der Modellierung auf Basis von Flächen ist, dass eine sehr gute Oberflächenqualität erreicht wird. Es gibt aber auch entscheidende Nachteile, die gegen eine Modellierung auf Basis von Flächen sprechen. So ist man gezwungen, unbedingt einen geschlossenen Flächenverbund zu erzeugen, was gerade bei der komplexen Form der Schädelknochen nicht trivial ist. Des weiteren ist es mit der flächenbasierten Modellierung nur sehr schwer möglich, Hinterschnitte, Öffnungen im Knochen sowie die Innere Struktur, z.B. Nervenbahnen, in das Modell zu integrieren. Durch die Berechnung der Freiformflächen sind die Anforderungen an die Rechentechnik sehr hoch.

Modellierung eines Volumenkörpers durch das Zusammensetzen von Schichten

Die dritte bisher getestete Variante zur Modellierung von Schädelknochen ist die Modellierung von dünnen Volumenscheiben im Modul „Part Design" und deren anschließende Zusammenfügung zu einem Volumenkörper. Diese Verfahrensweise ähnelt den gängigen Rapid Prototyping Verfahren. Nur entsteht kein reales, sondern ein virtuelles Modell.

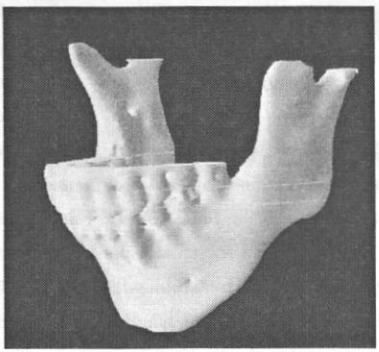


Abb. 4: Unterkiefer bestehend aus dünnen Scheiben

Dieser Ansatz verzichtet völlig auf die Verwendung von Flächen. Es werden aus der STL – Fläche durch ebene Schnitte Kurven erzeugt, die die äußere Berandung der Knochenoberfläche darstellen. Ebenso sind nach der Erzeugung der Kurven auch die Berandungskurven der Inneren Strukturen sichtbar. Der Abstand der Kurven untereinander ist sehr klein. Je geringer der Abstand der Kurven zueinander ist, desto genauer wird auch das Modell des Schädels. Diese entstandenen Kurven sind in der Regel geschlossen. Dies ist für die Verwendung bei diesem Ansatz auch unbedingt nötig, da sonst die Erzeugung der Volumenscheiben fehlschlägt. Wenn sich im STL-File Löcher befinden, entstehen offene Kurven. Um die Löcher im STL-File zu entfernen, stellt CATIA eine Funktion zur Verfügung, die dies halbautomatisch erledigt. Ein manuelles editieren der Kurven ist aber auch möglich. Hat man die Kurven erzeugt, so werden aus den einzelnen Kurven durch Extrusion Volumenscheiben erstellt. Die Dicke der Volumenscheiben sollte genau so groß sein wie der Abstand zwischen den einzelnen Kurven. So entsteht Scheibe für Scheibe ein zusammenhängender Volumenkörper.

Sollte eine Erzeugung einer Volumenscheibe nicht möglich sein, so ist dies bei dieser Variante unkritisch, da im Volumenmodell dann nur eine kleine Lücke verbleibt. Um solche Lücken zu großen Teilen zu schließen und auch Rundungen deutlicher heraus zu stellen, ist es mög-

lich, die Scheiben nicht nur in eine Richtung zu erstellen, sondern in mehrere und das Ergebnis zu überlagern.

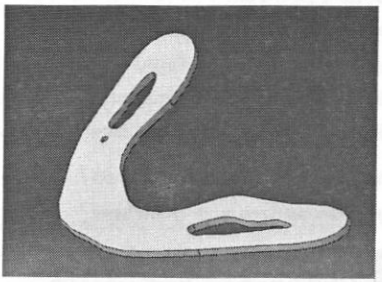


Abb.5: innere Knochenstruktur ist mit modellierbar

Dieses Vorgehen zur Modellierung ist auf wenige, einfache Operationen beschränkt, so dass diese Vorgehensweise sehr gut automatisierbar ist. Erste Algorithmen dafür liegen bereits vor.

Die inneren Strukturen, wie z.B. Nervenkanäle, werden bei einer CT-Aufnahme mit abgebildet und sind auch im STL-File vorhanden. Bei der Modellierung mit dünnen Volumenscheiben hat man die Wahl, ob man nur die äußere Struktur erzeugt oder ob man die inneren Strukturen berücksichtigt. Innere Strukturen wären dann als Hohlräume im 3D Modell zu erkennen. Schwierig ist es automatisch zu unterscheiden, welche Kurven zu den äußeren und welche zu den innern Strukturen gehören. Auf das entstandene Volumenmodell sind alle CATIA Funktionen anwendbar. Vorteil dieser Modellierungsweise ist, dass man die Problematik der komplexen Flächen umgeht und nur einen einfachen Algorithmus mehrmals hintereinander ablaufen lässt. Diese Volumenscheiben sind im Gegensatz zu den Flächen sehr gut handhabbar und unempfindlich gegen Fehler, auch bei schlechtem Eingangsmaterial. Das Verfahren ist in seinem Einsatzspektrum nicht auf die Schädelknochen beschränkt und ist daher für viele verschiedene Anwendungen einsetzbar. Als Nachteil dieser Methode ist zu nennen, dass die Oberflächenqualität schlechter ist als bei den ersten beiden Verfahren, weil durch das Zusammensetzen der einzelnen Scheiben eine Treppenstruktur entsteht. Aufgrund der Ungenauigkeit der CT-Daten und der Forderungen der Chirurgen kann dieser Nachteil ignoriert werden.

Der letzte Ansatz, der eine Art „Virtuelles Rapid Prototyping" darstellt, erfüllt bisher am besten die Anforderungen des CAD-Systems für weitere Modellierungen am Schädel. Mit dieser Variante ist es möglich, schnell und ohne große manuelle Eingriffe ein individuelles Modell auf Grundlage eines CT Datensatzes zu erstellen. An diesem Modell ist es möglich, Knochen zu segmentieren und zu separieren. Knochenfragmente können interaktiv positioniert werden und auch die Einbringung von Befestigungselementen ist simulierbar. Die Modellierung und Positionierung von Implantaten zur Behebung von Knochendefekten ist anhand des CAD-Modells problemlos möglich.

4 Visualisierung und Manipulation an einem 3D-Ein- und Ausgabegerät

Die Aufgaben der Operationsplanung, die im ersten Abschnitt aufgeführt wurden, sind mit einem CAD-System lösbar. Auf der Basis des im Abschnitt 2 modellierten Schädel wird die Segmentierung von Knochenfragmenten, Positionierung von Knochenfragmenten, Einbringung von Befestigungselementen sowie Positionierung von Implantaten [8, 9,10] ausgeführt. Beim Aufbau des CAD-Modells des Schädels werden bei einer Knochenfraktur die beiden Knochenteile als zwei getrennte Körper dargestellt. Dadurch ist es möglich, diese beiden Knochenteile mittels Softwarewerkzeugen des CAD-Systems zueinander zu positionieren. In den folgenden beiden Abbildungen ist diese Tätigkeit im CAD-System dargestellt.

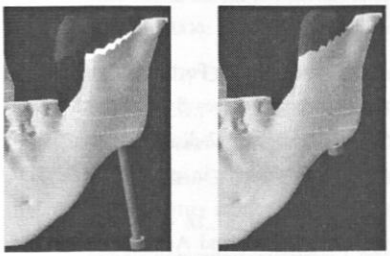


Abb.6 :Unterkieferknochen in CATIA vor (links) und nach (rechts) der Positionierung eines Knochenfragments und eines Befestigungselements

Bei der Einbringung von Befestigungselementen können Fehler auftreten, die in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt sind.

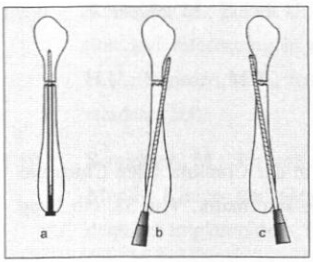


Abb.7:
a: ideale Position der Schraube
b, c: fehlerhafte Position der Schraube
(Knochenfragment wird nicht befestigt)

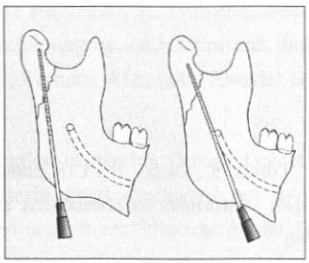


Abb. 8:
links: ideale Position der Schraube
rechts: fehlerhafte Position der Schraube
(Nervenbahn verletzt)

In den bisherigen, im chirurgischen Einsatz befindlichen Operationsplanungssystemen lassen sich diese Fehler nur aufgrund der großen Erfahrung des Chirurgen minimieren. Der Chirurg hat aber keine Möglichkeit, im Vorfeld der Operation das Planungsergebnis zu verifizieren. Durch den Einsatz eines CAD-Systems wird dieses Defizit behoben, weil sowohl die beiden Knochenteile mit Nervenbahn als auch die Schraube als 3D-Modell vorhanden sind. Mit den Softwarewerkzeugen des CAD-Systems kann die Schraube so ausgerichtet werden, dass sie

sowohl in das Knochenfragment am günstigsten Ort eindringt als auch eine Nervenbahn nicht verletzt. In den folgenden beiden Abbildungen ist diese Tätigkeit im CAD-System dargestellt.

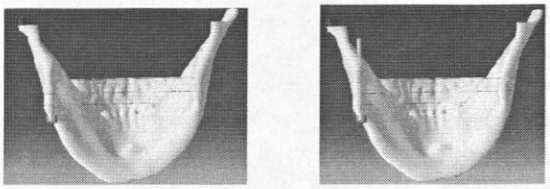


Abb.9: Positionierung einer Schraube zur Fixierung von Knochenfragmenten in CATIA, links korrekte Position, rechts fehlerhafte Position

Diese Möglichkeiten der Operationsplanung stellen einen wesentlichen Fortschritt gegenüber den bisher üblichen Systemen dar [11,12]. Trotzdem erlaubt auch dieses System noch keine echte 3-dimensionale Arbeitsweise, weil auch bei dieser Lösung am 2-dimensionalen Bildschirm gearbeitet wird. Erst mit der Übertragung des CAD-Modells in eine virtuelle 3D-Umgebung kann der Chirurg die Operationsplanung an einem echten virtuellen 3D-Modell durchführen. Es existieren inzwischen vielfältige virtuelle 3D-Ein- und Ausgabegeräte, die eine direkte Arbeit am 3D-Modell ermöglichen. Es ist denkbar, den im CAD-System modellierten Unterkiefer auf einer Workbench oder auch in einer CAVE zu visualisieren und die Positionierung und Fixierung der Knochenfragmente direkt an dem virtuellen 3D-Modell vorzunehmen.

Literatur

[1] Keeve, E.; Girod, S.; Girod, B.: Computergraphik in der Craniofacialen Chirurgieplanung. it+ti - Informationstechnik und Technische Informatik, Vol. 38, No.3, pp. 29-34, 1996

[2] Hoffmann, J.: Erfahrungen bei der Fertigung und dem Einsatz von Stereolithographiemodellen auf dem Gebiet der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. In: Möglichkeiten und Anwendungen von Rapid Prototyping Technologien in der Medizintechnik . Lichtenstein/Sachsen, 14. Oktober 1999, Beckmann-Institut für Technologieentwicklung e.V., 1999

[3] Marmulla, R.: Computergestützte Knochensegmentnavigation. Habilitationsschrift. Regensburg, Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Berlin: Qintessenz-Verl., 2000

[4] Haßfeld, S.: Rechnergestützte Planung und intraoperative Instrumentennavigation in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Habilitationsschrift. Heidelberg, Reihe: Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Berlin: Quintessenz-Verlag, 2000

[5] Tiede, U.: Realistische 3D-Visualisierung multiattributierte und multiparametrischer Volumendaten. Dissertation, Hamburg, 1999

[6] G.Goebbels, K.Troche, M.Braun, A.Ivanovic, A.Grab, K.von Lübtow, H.F.Zeilhofer, R.Sader, F.Thieringer, K.Albrecht, K.Praxmarer, E.Keeve, N.Hanssen, Z.Krol, F.: Development of an Augmented Reality System for intraoperative navigation in maxillo-facial surgery. Internationale Statustagung "Virtuelle und erweiterte Realität", Leipzig 2004; http://informatiksysteme.pt-it.de/vr-ar-3/

[7] Schöne, C.; Carlsen, U.; Schreiber, S.: Digitalisieren und Reverse Engineering, In: Fichtner, D.; Künanz, K. (Hrsg.): 50 Jahre Lehrstuhl Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik an der TU Dresden. Tagungsband, Dresden, 26.09.03, TU Dresden, S. 36-41, ISBN 3-86005-372-8

[8] Schneider M., Eckelt U., Hietschold V.: Positionierung von enossalen Implantaten mittels computerassistierter Operationsnavigation. In: Kongenitale Deformitäten der Kopf-Hals-Region. Gattinger, B.; Schwipper, V.: (eds) Münster, 2000, S. 99-108, ISBN 3 901539 050

[9] Schneider M., Eckelt U., Lauer, G.; Hietschold V.: Frameless intraoperative navigation and referencing in maxillofacial surgery –Advances and limitationes. Lemke, H.U.; Vannier, MW.; Inamura, K.; Farman, AG.: (eds) Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2001

[10] Schneider, M.: Einsatz der Operationsnavigation (Image Guidet Surgery) in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Präzisionsanalyse zur navigationsgestützten dentalen Implantologie. Eine experimentelle und klinische Studie, Dissertation, 2001

[11] Stelzer, R.:Virtuelle Rekonstruktion – Methodik und Werkzeuge Workshop „Virtual Reality & Tissue Engineering" TU Dresden, Dezember 2003, unveröffentlicht.

[12] Koßler, A., Funke, M.: Virtuelle Segmentierung und Fragmentpositionierung zur Planung von navigationsgestützten operativen Eingriffen, Workshop TU Dresden, März 2004, unveröffentlicht

Entwicklung von Zellkultursystemen mit Hilfe von Rapid Prototyping Verfahren

Frank ENGELMANN, André HILLIGER

KEK GmbH, Bad Schmiedeberg

Abstract

Zellkulturen haben heute einen großen Stellenwert in der medizinischen und pharmazeutischen Technik und sind aus vielen wissenschaftlichen Bereichen (siehe Abschn. 2) nicht mehr wegzudenken. Besonders in den letzten zwanzig Jahren konnten durch moderne Methoden der Zellkultivierung bedeutende Fortschritte bei der Züchtung und Rekonstruktion von tierischen und menschlichen Geweben erzielt werden [1]. Gekennzeichnet durch immer neue Anbieter und vielfältige Produkte ist gegenwärtig auf dem Markt der Zellkultivierung ein starker Verdrängungswettbewerb vorherrschend. Um in diesem Sektor effektiv und gezielt neue marktreife Produkte entwickeln zu können, müssen schnelle und flexible Entwicklungs- und Fertigungsverfahren im Bereich des Prototypenbaus bis hin zur Kleinserienfertigung zum Einsatz kommen. Durch die Nutzung von Rapid Prototyping Verfahren über dem gesamten Produktentwicklungsprozess soll eine kosteneffiziente und zeitoptimierte Entwicklung neuer Zellkultursysteme, auch von Produkten mit fachspezifischem Anwendungsprofil und dadurch bedingte niedrige Produktionsstückzahlen, ermöglicht werden.

Keywords

Zellkultursysteme, Rapid Prototyping, Konstruktiver Entwicklungsprozess

1 Zellkultur und Zellkultursysteme

Zellkultur: Diese wird gewonnen, indem das Gewebe durch mechanische und/oder chemische Mittel zerstört wird. Aus den so gewonnenen Zellenaggregaten oder Gewebestücken kann unter geeigneten Bedingungen eine Primärkultur auswachsen, aus der sich durch anschließende Subkultivierung eine sekundäre Zelllinie entwickeln kann. Wenn dieses Überimpfen (Passagieren) unendlich weitergeführt werden kann, ohne dass die Zellen absterben, liegt eine Dauerzelllinie („etablierte" oder „stabile" Zelllinie) vor [2]. Die Zellen in einer Kultur können genetisch identisch sein oder auch genetische Veränderungen zeigen.

Zellkultursysteme: dienen zur Erhaltung und/oder zur Vermehrung von tierischen oder pflanzlichen Zellen außerhalb des Organismus (im Labor) unter Nachahmung der organotypischen Bedingungen. Die Zellen können in diesen räumlich begrenzten Systemen wachsen und sich

gegebenenfalls teilen, sowie dabei bestimmte Nutzstoffe produzieren. Beispiele für Zellkulturgefäße sind Petrischalen, Reagenzgläser, Kulturflaschen, Perfusionskammern, Mikrowellplatten bis hin zu komplexen Bioreaktoren.

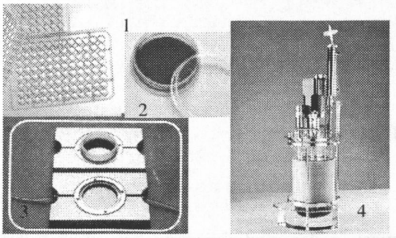


Abb. 1: Beispiele für Zellkulturgefäße

1- Zellkultur Microplatte [3]

2- petriPERM-Schale [4]

3- Perfusionskammer [5]

4- Bioreaktor [6]

Bei der Kultivierung von Zellen im in-vitro („im Glas") Versuch müssen die geschaffenen Bedingungen möglichst identisch mit denen des Ursprungsorganismus sein. Dazu sind oftmals spezielle Apparaturen und Medien notwendig. Für solche Anwendungsfälle gibt es eine Vielzahl von Peripherietechnik (Rührer, Schüttler, Dosierer, Pumpen, Inkubatoren, Wärmetauscher, etc.).

2 Anwendungsgebiete von Zellkultursystemen

Zellkultursysteme werden in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung, sowie der industriellen Produktion verwendet. Ein breites Anwendungsfeld findet die Zellkulturtechnik in der Medizin bzw. Medizintechnik, z. B. besonders auf dem Gebiet der Arzneimitteltestung und dem Tissue Engineering (siehe Kap. 3). Des Weiteren gibt es vielfältige Anwendungen im Bereich der Lebensmittelindustrie, Landwirtschaft und Umwelttechnik (Abb. 2).

Ein Ziel des Einsatzes moderner Zellkultursysteme ist es, in Zukunft auf eine große Anzahl von Tierversuchen verzichten zu können. So können z. B. Zellverbände und Gewebe sowie Testsysteme mit organspezifischen Eigenschaften für Tests auf Wirksamkeit und Wirkmechanismus sowie Wirkungsdauer und Abbau von potenziellen Arzneimitteln eingesetzt werden [7].

Seit Jahren werden aus Kulturen genetisch veränderter Zellen Arzneimittel für die Therapie verschiedenster Erkrankungen gewonnen. Bei den meisten Substanzen handelt es sich um Proteine, die mit Hilfe von Säugetierzellen produziert werden. Beispiele sind dafür Blutgerinnungsfaktoren, Wachstumsfaktoren oder auch monoklonale Antikörper.

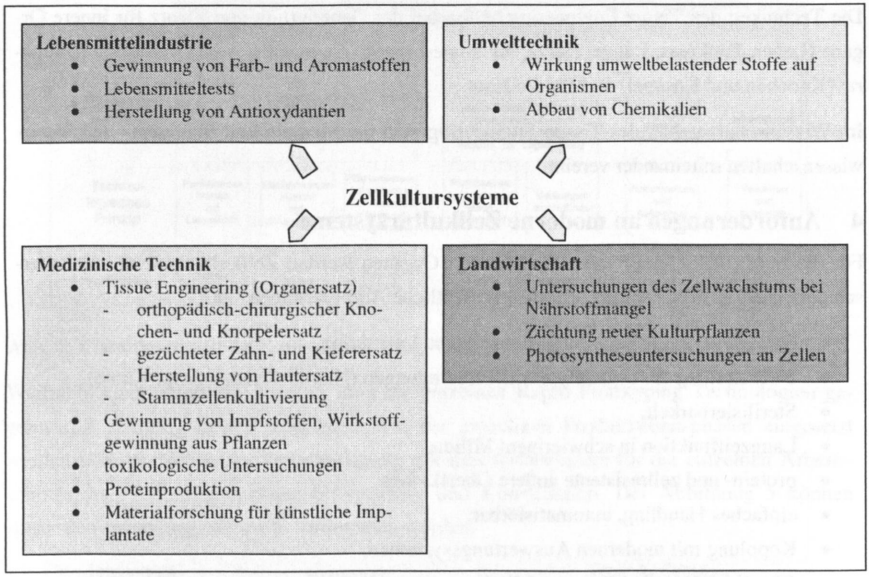


Abb. 2: Anwendungsgebiete für Zellkultursysteme

3 Tissue Engineering

Ein Hauptanwendungsgebiet von Zellkulturtechnik ist das Tissue Engineering.

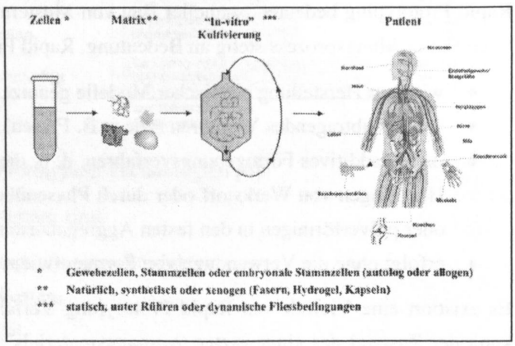


Abb. 3: Prinzip des Tissue Engineering [7]

Das Tissue Engineering (Züchtung künstlichen Gewebes) befasst sich mit dem Produkt Zelle selbst bzw. aus Zellen bestehenden Organen oder Geweben. Tissue Engineering hat die Veränderung von Implantaten, in-vitro hergestellten lebenden Geweben, Zellen oder Molekülen zum Ersatz oder zur Unterstützung der Funktion fehlender oder verletzter Körperteile zum Ziel. Die Vorteile der in-vitro Züchtung autologer artifizieller Ersatzgewebe oder –organe sind insbesondere die Vermeidung von Entzündungserscheinungen, Abstoßungsreaktionen, sowie Komplikationen bei der Blutgerinnung. Solche können z. B. bei der Transplantation von körperfremden Spenderorganen oder künstlichen Organen bzw. Gelenken auftreten.

Die Techniken des Tissue Engineering helfen bei der Generierung von Ersatz für innere Organe (Leber, Pankreas, Lunge, Herz), für Sinnesorgane (Auge, Ohr, Nase) für den Stützapparat (Knochen und Knorpel) und für die Haut.

Im Wissenschaftsgebiet des Tissue Engineering sind die Medizin und Ingenieur- und Naturwissenschaften miteinander vereint.

4 Anforderungen an moderne Zellkultursysteme

Für die in-vitro Züchtung von Geweben und Organen werden Zellkultursysteme mit unterschiedlichsten Anforderungen benötigt. Wesentliche Anforderungen sind:

- Gewebeverträglichkeit / immunologische Interaktion,
- Nachahmung der organotypischen Bedingungen (Nährstoffversorgung, Klima),
- Sterilisierbarkeit,
- Langzeitfunktion in schwierigem Milieu,
- protein- und zellresistente äußere Oberflächen,
- einfaches Handling, automatisierbar,
- Kopplung mit modernen Auswertungssystemen,
- Günstiges Preis/Leistungsverhältnis.

5 Rapid Prototyping im konstruktiven Entwicklungsprozess

Rapid Prototyping bedeutet „schneller Bau von Mustern" und gewinnt im heutigen konstruktiven Entwicklungsprozess stetig an Bedeutung. Rapid Prototyping

- wird zur Herstellung physischer Modelle genutzt,
- ist kein abtragendes Verfahren (wie z. B. Fräsen),
- ist ein additives Formgebungsverfahren, d. h. die Fertigung des Bauteils erfolgt durch Hinzufügen von Werkstoff oder durch Phasenübergang eines Materials vom flüssigen oder pulverförmigen in den festen Aggregatzustand,
- erfolgt ohne die Verwendung von Formen (wie z. B. beim Giessen) [8].

Es existiert eine Vielfalt von Rapid Prototyping Verfahren. Um diese einteilen zu können, kann der Zustand des eingesetzten Ausgangsmaterials als Kriterium genutzt werden. In der Abbildung 4 ist eine mögliche Klassifizierung der einzelnen Rapid Prototyping Verfahren dargestellt.

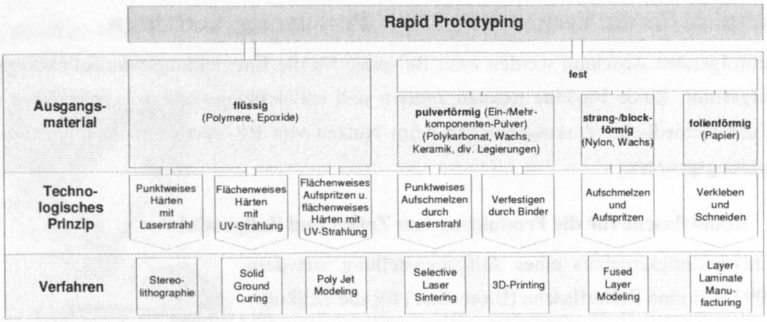


Abb. 4: Klassifizierung von Rapid Prototyping Verfahren [8]

Weiterhin kann aufgeführt werden, dass die einzelnen Rapid Prototyping Technologien gegenwärtig vielfältig in den Arbeitsschritten der jeweiligen Produktlebensphasen eingesetzt werden können. Neben der Produktplanung gilt dies insbesondere für die einzelnen Arbeitsschritte der Produktlebensphase Entwicklung und Konstruktion. Der Abbildung 5 können spezielle Anwendungsbeispiele entnommen werden.

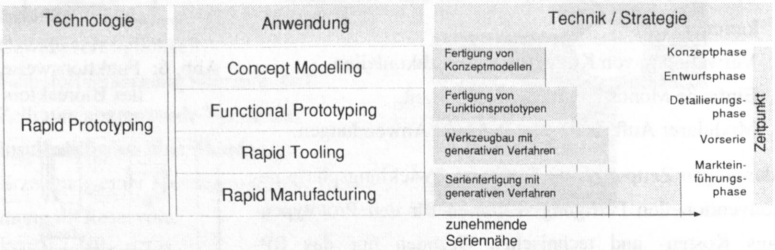


Abb. 5: Bisheriger Einsatz von Rapid Prototyping Technologien [9]

Die wesentlichen Vorteile von RP-Verfahren sind:

- eine Verkürzung der Entwicklungszeit eines Produktes,
- Reduzierung der Entwicklungskosten,
- Verbesserung der Produktqualität,
- Optimierung der Erzeugnisse,
- Überprüfung der Geometriedaten und
- Erhöhung der Marktfähigkeit von Produkten.

Alle diese Vorteile lassen sich auch bei der Entwicklung von Zellkultursystemen nutzen. RP-Verfahren bieten somit kostengünstige Alternativen zu bisherigen Fertigungstechnologien (spanende Bearbeitung, Kunststoffspritzguss). Speziell bei der Entwicklung von Zellkammern gekoppelt mit Mikrofluidiksystemen erweisen sich neue RP-Technologien als besonders leistungsstark.

6 Beispiele für die Verwendung Rapid Prototyping Verfahren

Im nachfolgenden Abschnitt werden zwei Beispiele für die Entwicklung von Zellkulturgefäßen aufgeführt. Beide Projekte trennen zeitlich und entwicklungstechnisch zehn Jahre und haben unterschiedliche Voraussetzungen beim Nutzen von RP-Verfahren im konstruktiven Entwicklungsprozess.

6.1 Rollerflasche für die Produktion von Zellen und Zellprodukten

Das Entwicklungsergebnis einer Aufgabenstellung aus dem Jahr 1992 war eine Rollerflasche (Bioreaktor) für die Zellkultivierung zur Produktion monoklonaler Antikörpern oder für die Biomasseproduktion. Diese hatte die folgenden Hauptanforderungen:

- Sterilisierbarkeit,
- autoklavierbar bei 121 °C, 30 min.,
- kosteneffiziente Produktion der Zellen,
- bestehend aus Versorgungskammer und Produktionskammer,
- Verwendung von Kunststoff- und Silikonteilen,
- Einfache Montage und Handhabbarkeit,
- Modularer Aufbau für verschiedene Anwendungen.

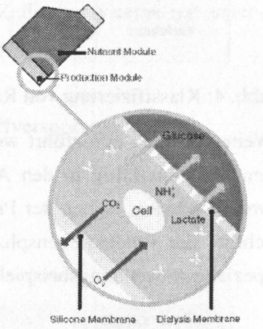


Abb. 6: Funktionsweise des Bioreaktors

Zum damaligen Zeitpunkt stand in der Entwicklungsphase neben konventionellen Fertigungsverfahren für den Prototypenbau aus Kosten- und technischen Gründen nur das RP-Verfahren „Stereolithographie" zur Verfügung. Dieses wurde während des gesamten iterativen Entwicklungsprozesses zur stetigen Optimierung des Produktes verwendet. Damals konnten jedoch noch keine bioverträglichen Werkstoffe für den Prototypenbau zum Einsatz kommen. Die Abbildung 7 zeigt den Entwicklungsfortschritt bei der Projektbearbeitung. Aufgrund des festgesetzten Kostenumfangs für das Projekt wurden von jedem Prototypen nur jeweils 2 Muster gebaut. Diese dienten ausschließlich der funktionellen Bewertung (z. B. der Verschlusstechnik, Dichtheitsprüfung) der Funktionsmuster. In-vitro Versuche mit den geplanten Membranen (zur Nährstoffversorgung) und Trägermaterialien (spätere Zellwachstumsfläche) wurden separat in Testreihen an Versuchsaufbauten durchgeführt. Ursache dafür war das Fehlen geeigneter Werkstoffe bei den RP-Verfahren und die mangelhafte Passgenauigkeit von Stereolithographieteilen. Weiterhin konnten konventionelle Fertigungsverfahren aus Kostengründen für die Prototypenherstel-

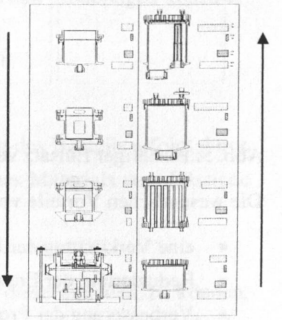


Abb. 7: Entwicklungsstadien

lung nur eingeschränkt genutzt werden. Die Abbildung 8 zeigt das fertige Produkt des Bioreaktors (Rollerflasche).

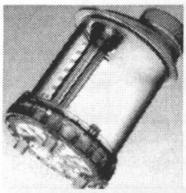


Abb. 8: miniPERM Bioreaktor [10

6.2 Kammer für Insulinproduzierende Zellen

Ziel dieses Projektes 2003 war die Entwicklung einer Zellkammer für Insulin produzierende nicht-beta Zellen. Diese sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Einschließen der Zellenlinie in eine Kammer,
- Gewebeverträglichkeit,
- Nährstoffversorgung über eine den Zellraum abgrenzende Membran,
- Insulindiffusion über Membran,
- Erzeugung einer Membrananströmung im Reservoir,
- Sterilisierbar,
- geringe Bauhöhe,
- kostengünstige Fertigung von 20 Versuchsmustern.

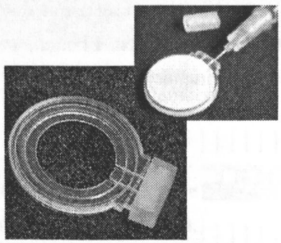


Abb. 9: Zellkammer 1. Generation, Kammerrahmen hergestellt durch 3D-Kunststoffplottverfahren

Die Zellkammer wurde nach methodischen Gesichtpunkten entwickelt. Bereits während der Konzeptphase entstanden vereinfachte Funktionsmuster (Abb. 9) mittels Rapid Prototyping Verfahren, die in ersten in-vitro Untersuchungen bewertet wurden. Durch die schnelle Fertigung der Versuchsmuster konnte die Entwicklungszeitspanne optimiert werden und Ergebnisse aus den ersten Voruntersuchungen flossen kontinuierlich in den weiteren Entwicklungsprozess ein. Darauf aufbauend wurde die Zellkammer der 2. Generation konzipiert und gestaltet.

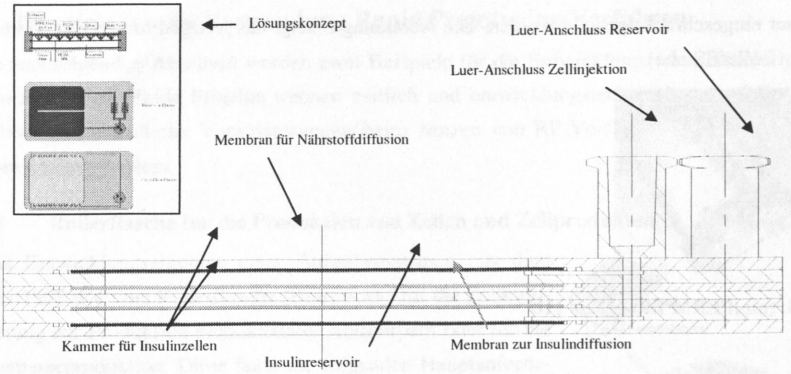


Abb. 10: Lösungskonzept und Schnittansicht durch Zellkammer 2. Generation

Für die Herstellung der sieben Ebenen der Zellkammer wurde das Mikrosandstrahlverfahren gewählt (Abb. 11). Dabei werden mit einer Maskentechnik die gewünschten Konturen aus einem Glassubstrat abgetragen. Ebenen, zwischen die keine Membran geklebt wird, wurden mittels Bonden miteinander gefügt.

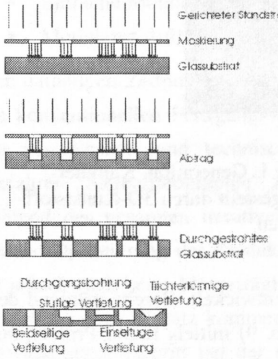


Abb. 11: Ablauf des Mikrosandstrahlens

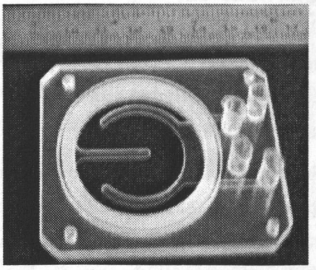
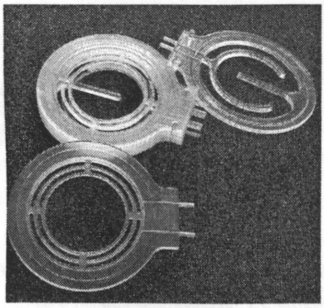


Abb. 12: Zellkammer 2.Generation

Das Fertigungsergebnis bildet eine kompakte und funktionstüchtige Zellkammer (Abb. 12). Durch den Einsatz von Glas als Rahmenwerkstoff ist die Kammer sterilisierbar und gewebeverträglich. Die Kammer, gekoppelt mit einer Mikropumpe, befindet sich derzeit in der in-vitro Testphase.

Parallel zu den angelaufenen in-vitro Untersuchungen wird der Aufbau der Zellkammer weiterhin optimiert. Ziel ist es, bei gleich bleibender Baugröße eine größere Wachstumsoberfläche für die Insulin produzierenden Zellen zu schaffen. Unter Nutzung eines Kunststoffplotverfahrens konnten Teile erzeugt werden (Abb. 13), die diese Anforderungen erfüllen. Dadurch wurde die Wachstumsoberfläche verdoppelt. Resultierend wird mit einer steigenden Insulinproduktion gerechnet.



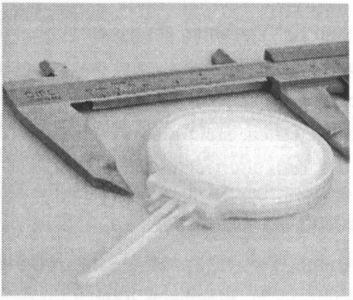


Abb. 13: Kompaktzellkammer
a) Einzelteile
b) mit äußeren Membranen

7 Zusammenfassung

Zellkultursysteme besitzen ein breitgefächertes Anforderungsprofil. Eine Vielzahl von Randbedingungen ist während der Entwicklung zu beachten (siehe Abschn. 4).

Abhängig von der Zweckbestimmung und Klassifizierung, sind neben Ansprüchen der Funktion, Ergonomie und Kosteneffizienz spezifische Ansprüche zu berücksichtigen. So ist zum Beispiel bei Zellkultursystemen für das Tissue Engineering unter anderem auf die Sterilisierbarkeit, Langzeitfunktion in schwierigem Milieu und die Gewebeverträglichkeit/ immunologische Interaktion zu achten. Wie im Abschnitt 6 gezeigt, bietet die Nutzung von RP-Verfahren bei der Entwicklung solcher Systeme vielfältige Ansatzpunkte. Gegenwärtig erfolgt dies vordergründig in den ersten beiden Produktlebensphasen zur Unterstützung des gesamten Planungs- und Entwicklungsprozesses. Die dargelegten Beispiele zeigen eine mögliche Tendenz im konstruktiven Entwicklungsprozess von Zellkultursystemen.

Durch die schnelle Fertigung der Versuchsmuster auf der Basis neuer RP-Technologien konnte die Entwicklungszeitspanne optimiert werden. In den letzten Jahren wurden verschiedene neue RP-Verfahren entwickelt. Mit Hilfe dieser ist es z. B. möglich, eine parallele Bearbeitung mehrerer Teile zu realisieren. Dadurch kann ein günstiges Preis-/ Leistungsverhältnis bei der Herstellung von Kleinserien erreicht werden. Des Weiteren gibt es Technologien, die die Fertigung komplizierter Bauteile mit sehr „engen" Toleranzen (mit Hinterschnitten, mehreren Ebenen), welche mit konventionellem Kunststoffspritzguss nur mit großem Aufwand gefertigt

werden können, ermöglichen. Moderne RP-Anlagen erlauben die Verwendung bioverträglicher Kunststoffe bzw. anderer Werkstoffe (Glas, Keramik) für die Herstellung verwendungsfähiger Funktionsmuster. Dadurch ist es realisierbar, ohne kostenintensive Werkzeuge alle relevanten Anforderungen an das Zellkultursystem zu testen bzw. zu überprüfen. Ebenso können „Nullserien" des Endproduktes mit Hilfe von RP-Verfahren gefertigt werden. Dadurch sind in-vitro Versuche zur Erlangung gesicherter Erkenntnisse zur Sterilisierbarkeit, Langzeitfunktion und Gewebeverträglichkeit bereits in den ersten Arbeitsschritten der Produktentwicklung möglich.

Somit sind RP-Verfahren ein wesentliches Hilfsmittel im Entwicklungsprozess. Sie unterstützen die iterative Vorgehensweise und ermöglichen die Gewinnung optimaler Forschungs- und Entwicklungsergebnisse. Insbesondere das frühzeitige kostengünstige Erzeugen von prozessgenerierten Daten, stellt eine wesentliche Neuerung zu bisherigen Entwicklungen auf dem Gebiet der Zellkulturtechnik dar.

Literatur

[1] Minuth, W. W., Strehl, R., Schumacher, K., Zukunftstechnologie Tissue Engeneering. Wiley-VCH, Weinheim 2003

[2] Scheper, Th., Kreye, L., Schippers, Chr., Bioprozesstechnik. Vorlesungsskript, Hannover 2004

[3] Zellkultur Microplatte, Greiner-Bio One GmbH, Maybachstrasse 2, D-72636 Frickenhausen

[4] petriPERM-Schale, In Vitro Systems & Services GmbH, Rudolf-Wissell-Str. 28, 37079 Göttingen

[5] Perfusionskammer, POC, LaCon, Kornhalde 7, 89195 Staig

[6] Bioreaktor BIOSTAT® B, Satorius BBI Systems GmbH, P.O. Box 13 63, 34203 Melsungen

[7] Kasper, C., Stahl, F., Tissue Engineering: Der Mensch sein eigenes Ersatzteillager. http://www.i-s-b.org/2020/3/index.htm

[8] Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik, Magdeburg 2004

[9] Birke, C., Der Einsatz von Rapid Prototyping Verfahren im Konstruktionsprozess. ISBN: 3-8322-0069-X, Shaker Verlag, Aachen

[10] miniPERM, In Vitro Systems & Services GmbH, Rudolf-Wissell-Str. 28, 37079 Göttingen

Maßgeschneiderte Implantatmaterialien für den Gewebeersatz auf der Basis von mineralisiertem Kollagen

Michael GELINSKY, Wolfgang POMPE

Technische Universität Dresden

Abstract

Aus biomimetisch erzeugtem, mineralisiertem Kollagen kann eine Reihe unterschiedlicher Implantatmaterialien für den Hartgewebeersatz hergestellt werden, mit denen in der Chirurgie verschiedene Arten von Knochen- oder Knochen/Knorpel-Defekten behandelt werden können. Außerdem können diese Materialien z. T. so modifiziert werden, daß sie für weitere Einsatzgebiete verwendet werden können. Der chirurgischen Therapie kann damit ein vielfältiges System maßgeschneiderter Lösungen angeboten werden.

Keywords

Biomaterial, biomimetisch, Hartgewebeersatz, Implantat, Tissue Engineering

1 Einleitung

Knochengewebe besteht im Wesentlichen aus dem Faserprotein Kollagen I, welches mit der Calciumphosphatphase Hydroxylapatit mineralisiert ist. Dieser Nanokomposit aus einem zugfesten Biopolymer und einer druckfesten mineralischen Phase verleiht Knochen seine außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften [1]. Knochengewebe befindet sich außerdem, so wie fast jedes lebende Gewebe, in einem von Zellen bewerkstelligten Prozess dauernder Erneuerung: Osteoclasten resorbieren die so genannte extrazelluläre Matrix (also das mineralisierte Kollagen) kontinuierlich – während Osteoblasten neue Matrix synthetisieren. Damit wird einem Verspröden des Knochens durch Alterungsprozesse vorgebeugt. Ein optimales, synthetisches Knochenersatzmaterial wird deshalb versuchen, die Eigenschaften lebenden Knochengewebes soweit als möglich nachzubilden und die natürlichen Erneuerungsprozesse nicht nachhaltig zu stören. Ein von uns seit Jahren verfolgter Ansatz in diesem Sinne ist die Erzeugung von Implantaten für den Hartgewebeersatz aus biomimetisch synthetisiertem mineralisiertem Kollagen.

2 Material und Methoden

Die biomimetische Herstellung mineralisierter Kollagen-Fibrillen erfolgt in einem synchronen Prozess, bei dem die Selbstassemblierung des Kollagens und die Abscheidung von na-

nokristallinem Hydroxylapatit (HAP) gleichzeitig stattfinden. Damit wird eine Kristallisation des HAP im Verbund der wachsenden Kollagen-Fibrillen – und damit die Bildung eines homogenen Kompositmaterials erreicht [2,3]. Als Ausgangsmaterial kann jedes beliebige Kollagen verwendet werden, sofern es in verdünnten Säuren molekular löslich ist und Fibrillen bildet. Für die hier beschriebenen Experimente wurde zumeist Kollagen Typ I bovinen Ursprungs (isoliert aus Kalbshäuten bzw. Rindersehnen) verwendet. Übliche Ansatzgrößen gehen von 1 g Kollagen aus und werden in einem Reaktionsvolumen von 2 l durchgeführt. Das mineralisierte Kollagen wird nach ca. 24-stündiger Reaktion durch Zentrifugation in Form eines wachsartigen, farblosen Feststoffes isoliert. Das gereinigte Endprodukt besteht (im getrockneten Zustand) aus ca. 30 Gew.-% Kollagen und 70 Gew.-% HAP, was der Zusammensetzung der extrazellulären Knochenmatrix recht nahe kommt.

3 Ergebnisse

Aus dem unter **2** beschriebenen Basismaterial, mineralisierten Kollagen-Fibrillen, konnten mit verschiedenen Methoden Biomaterialien für verschiedene medizinische Anwendungen entwickelt werden. Die wichtigsten seien im Folgenden vorgestellt.

3.1 Membranartige „Tapes" zur Defektabdeckung

Wird das durch Zentrifugation isolierte mineralisierte Kollagen mit dem ungefähr fünffachen Volumen an Mutterlauge kräftig aufgerührt, so entsteht eine leichflüssige und homogene Suspension. Diese kann durch Vakuumfiltration über eine Glasfilterfritte zu filterpapierartigen Membranen verdichtet werden; nach chemischer Quervernetzung durch das wasserlösliche Carbodiimid-Derivat EDC (*N*-(3-Dimethylaminopropyl)-*N*'-ethylcarbodiimid), welches kovalente Amidbindungen zwischen Carboxyl- und Amino-Seitenketten des Kollagens einführt, kann das Tape von der Fritte abgenommen und gefriergetrocknet werden [4,5]. Abb. 1 zeigt eine solche, ca. 0,3 mm dicke und im feuchten Zustand flexible Membran. Messungen der Zugfestigkeit im feuchten Zustand ergaben eine Bruchdehnung von ca. 20%, was für ein Material, welches zu 70% aus einer spröden, mineralischen Phase (HAP) besteht, ein ungewöhnlich hoher Wert ist. Für die Zugfestigkeit wurde ein Wert von ca. 1 MPa ermittelt. Abb. 2 und 3 zeigen rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der Mikrostruktur eines Tapes; das Material besitzt Mikroporen, welche jedoch zu klein für das Durchwachsen von Zellen sind. Damit ist das Material z. B. geeignet, um verschiedene Gewebstypen voneinander zu separieren. Eine mögliche Anwendung wird in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie gesehen: nach Zahnextraktion kann die entstehende Knochenhöhle (evtl. zusätzlich gefüllt mit einem Calciumphosphat-Granulat) mit einem Tape abgedeckt werden, um zu verhindern, dass der Hohlraum von schnell wachsenden Bindegewebszellen (Fibroblasten) ausgefüllt wird, welche eine Knochenregeneration vom umliegenden Kiefer her erschweren würde. Bisher werden für diese Anwendung nicht-resorbierbare Polymerfolien eingesetzt, welche dann aber in einem zweiten Eingriff wieder entfernt werden müssen, bevor das Zahnimplantat (in Form

einer Titanschraube) eingebracht werden kann. In einem Tierexperiment am Rattenschädel konnte bereits gezeigt werden, dass das Tape aus mineralisiertem Kollagen binnen ca. 4-6 Wochen im Körper vollständig resorbiert wird [6]. In einer Vielzahl von Zellexperimenten, sowohl mit Osteoblasten, als auch mit Osteoclasten und Kokulturen beider Knochenzelltypen, wurden die biologischen Eigenschaften der Tapes außerdem *in vitro* untersucht [7]. Abb. 4 zeigt humane, mesenchymale Stammzellen nach 5 Tagen Kultur auf einem Tape aus mineralisiertem Kollagen (Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme).

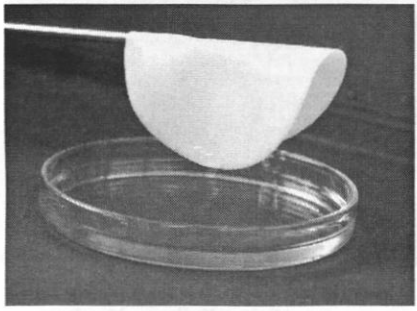


Abb. 1: Tape aus mineralisiertem Kollagen in feuchtem Zustand

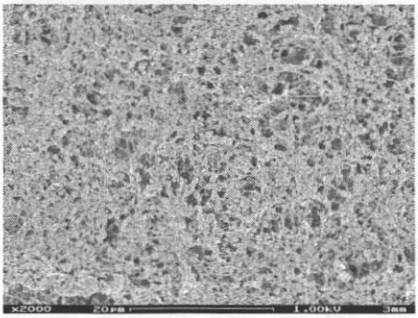


Abb. 2: Mikrostruktur des Tapes (REM, 2000×)

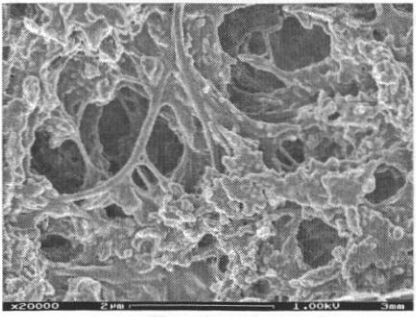


Abb. 3: Mikrostruktur (REM, 20.000×)

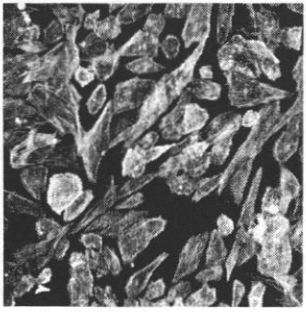


Abb. 4: hMSC auf einem Tape nach 5 d Kultur (Fluoreszenzmikroskopie)

3.2 Demineralisierte Membranen für das Tissue Engineering von Mundschleimhaut

Da es nicht möglich ist, natives Kollagen durch Vakuumfiltration zu einer Membran zu verdichten, wurde ausgehend von den unter **3.1** beschriebenen Tapes aus mineralisiertem Kollagen ein solches Material für das Tissue Engineering von Mundschleimhaut entwickelt. Hierzu wurde die Mineralphase HAP durch Behandlung der Tapes mit sauren TRIS-Pufferlösungen schonend entfernt. Die entstehenden Membranen sind glatt und im feuchten Zustand sehr flexibel, was eine Voraussetzung für die klinische Anwendung darstellt. Abb. 5 zeigt eine REM-

Aufnahme der Mikrostruktur. Für die Eignung als Mundschleimhautersatz werden die Kollagen-Membranen entweder nur mit Fibroblasten des Patienten besiedelt – oder aber schichtweise mit Fibroblasten und Gingiva-Keratinozyten. Ersteres wurde in Zusammenarbeit mit der Dresdner Universitätsklinik für MKG-Chirurgie (OA Dr. G. Lauer) bereits erfolgreich getestet: Abb. 6 zeigt eine REM-Aufnahme von primären, humanen Mundschleimhaut-Fibroblasten nach 5 Tagen Kultur auf einer demineralisierten Kollagenmembran [8].

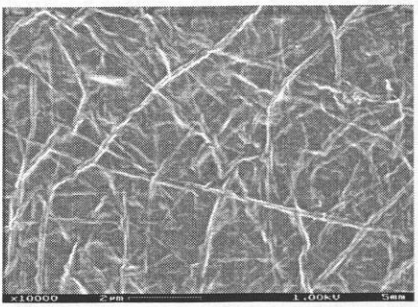


Abb. 5: Mikrosktruktur eines demineralisierten Tapes (REM, 10.000×)

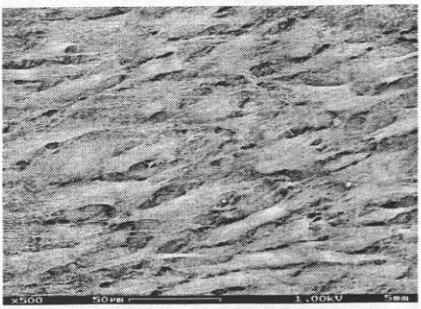


Abb. 6: Humane Fibroblasten nach 5 d Kultur auf einer Kollagen-Membran (REM, 500×)

3.3 Poröse, dreidimensionale Scaffolds für den Knochenersatz und das Tissue Engineering von Hartgewebe

Wird das Basismaterial weniger stark verdünnt (vergleiche **3.1**), so dass gerade noch gießfähige Suspensionen entstehen, so können über eine kontrollierte Gefriertrocknung dreidimensionale, poröse Scaffolds in beliebiger Größe und Form erzeugt werden (Abb. 7). Auch diese müssen jedoch durch chemische Quervernetzung mit EDC stabilisiert werden, um auch unter den Bedingungen der Zellkultur oder der Verwendung als Implantatmaterial *in vivo* die offenporige Struktur aufrechtzuerhalten. Abb. 8 zeigt die Mikrostruktur der porösen 3D-Körper: das interkonnektierende Porensystem mit Porendurchmessern von ca. 100-200 µm hat sich in Zellkulturexperimenten als ausreichend für das Einwachsen von Knochenzellen erwiesen. Im feuchten Zustand haben die 3D-Scaffolds elastische Eigenschaften, was die Möglichkeit der Zellkultivierung unter mechanischer Stimulation eröffnet. Damit können mit Osteoblasten besiedelte Matrices durch zyklische Belastung für die Bedingungen am späteren Implantationsort vorkonditioniert und die Knochenzellen bezüglich der Matrixsynthese stimuliert werden. Abb. 9 zeigt eine Auftragung der gemessenen Spannung gegen die Zeit bei 50-maliger zyklischer Kompression eines feuchten, zylindrischen Probenkörpers in Richtung der Längsachse auf jeweils 50% der ursprünglichen Höhe. Die Probe nimmt bei Entspannung jeweils wieder vollständig die Ausgangshöhe ein. Durch die Kokultivierung von Osteoblasten und Osteoclasten auf den porösen 3D-Scaffolds, welche ja hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung die extrazelluläre Knochenmatrix nachahmen, wird versucht, ein *in vitro*-Modell für die Umbauprozesse (*Remodeling*) von

für die Umbauprozesse (*Remodeling*) von Knochengewebe zu etablieren [10]. Abb. 10 zeigt ST-2 Maus-Osteoblasten nach 4 Wochen Perfusionsultur im Inneren eines Probenkörpers (REM-Aufnahme).

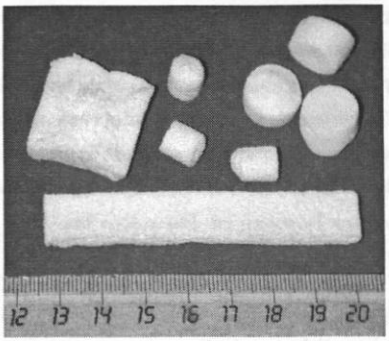


Abb. 7: Poröse 3D-Scaffolds in verschiedenen Größen und Formen (Maßstab = cm)

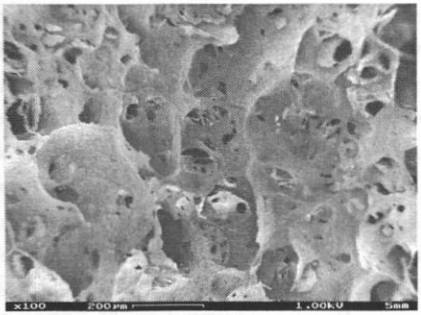


Abb. 8: Mikrostruktur eines porösen 3D-Scaffolds aus min. Kollagen (REM, 100×)

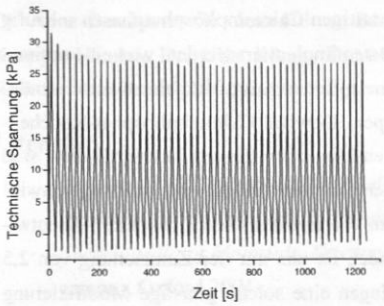


Abb. 9: Spannungs-Messung bei 50-maliger, zyklischer Kompression im feuchten Zustand

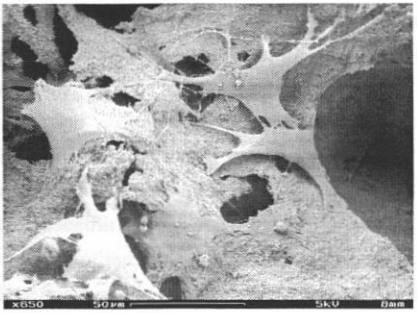


Abb. 10: ST-2 Maus-Osteoblasten im Inneren eines porösen 3D-Scaffolds (REM, 650×)

Die porösen 3D-Scaffolds aus mineralisiertem Kollagen wurden inzwischen auch bereits in zwei Tierexperimenten erfolgreich getestet. Am Universitätsklinikum von Sapporo auf Hokkaido (Japan) wurde das Material in Ratten implantiert (Dr. Yokoyama, Prof. Watari) – und an der Charité in Berlin (Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie; M. Scholz, Dr. Kandziora) in Verbindung mit so genannten Cages aus Titan für die knöcherne Fusion von Wirbelkörpern bei 24 Schafen verwendet. Weitere Experimente, auch zur Implantation von mit Zellen vorbesiedelten Scaffolds im Sinne des Tissue Engineering, sind in Vorbereitung.

3.4 Scaffolds für die Rekonstruktion von Knorpelgewebe

Da Knorpelgewebe nur über geringe Fähigkeiten zur Selbstheilung nach Verletzung oder bei degenerativen Veränderungen verfügt, sind hier auf Tissue Engineering basierende Therapieansätze besonders wichtig. Abgeleitet von den unter **3.3** vorgestellten Ergebnissen wurden (nicht-mineralisierte) poröse 3D-Scaffolds aus Kollagen und dem Glycosaminoglycan Hyaluronsäure entwickelt, welche als Trägerstrukturen für die Kultivierung von Chondrozyten (Knorpelzellen) *in vitro* dienen können. Durch die Kombination mit den beschriebenen mineralisierten 3D-Matrices lassen sich darüber hinaus biphasische, aber monolithische Implantatmaterialien für osteochondrale Defekte herstellen – also Defekte, bei denen neben dem Knorpelgewebe auch der darunter liegende Knochen mit betroffen ist. Für solche Implantatmaterialien besteht ein großer medizinischer Bedarf, weswegen sie in nächster Zeit noch weiterentwickelt und zellbiologisch untersucht werden sollen.

3.5 Calciumphosphat-Knochenzemente mit mineralisiertem Kollagen

Calciumphosphat-Knochenzemente werden seit vielen Jahren in der Orthopädie und Chirurgie klinisch eingesetzt. Hierbei handelt es sich zumeist um Pulver, welche nach Anmischen mit Wasser oder wässrigen Salzlösungen zu zementartigen Calciumphosphatphasen – häufig Hydroxylapatit – abbinden. Sie können somit als Pasten implantiert werden, was eine optimale Defektausfüllung garantiert und oftmals auch eine mikroinvasive Vorgehensweise ermöglicht. Die Aushärtung erfolgt dann erst im Körper. Obwohl Calciumphosphat-Knochenzemente verschiedener Hersteller sich im jahrelangen klinischen Einsatz bewährt haben, sind weitere Verbesserungen wünschenswert, insbesondere, um die Abbau- und Umbaugeschwindigkeiten im Körper zu erhöhen. Aufbauend auf dem von BIOMET Merck Biomaterials entwickelten Zement Calcibon®, welcher zu HAP abbindet, ist uns mit der Zumischung von 2,5 Gew.-% gefriergetrocknetem, mineralisiertem Kollagen eine solche günstige Modifizierung gelungen. Einerseits wird die Kohäsion der Zement-Paste durch den Biopolymer-Zusatz erhöht, was die Handhabung durch den Chirurgen erleichtert [11]. Andererseits wird der ausgehärtete Zement *in vivo* schneller resorbiert, was in mehreren Tierexperimenten an den Dresdner Universitätskliniken für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (OA Dr. Rammelt, Prof. Zwipp) und der Klinik für MKG-Chirurgie (Dr. Mai, Prof. Eckelt) gezeigt werden konnte [12]. In der Zwischenzeit konnten mehrere weitere Verbesserungen durch Funktionalisierung des Calciumphosphat-Kollagen-Komposites mit Zitronensäure, *O*-Phospho-L-serin, Osteocalcin bzw. RGD-Peptiden erreicht werden [11,13]. Auch zellbiologisch wurden die entwickelten neuen Knochenzemente gründlich untersucht [14]. Durch schichtweises Laminieren von Tapes aus mineralisiertem Kollagen (**3.1**) und Calciumphosphat-Zement konnten überdies Implantatmaterialien mit gradierten Eigenschaften erzeugt werden [15].

4 Zusammenfassung

Synthetisch hergestelltes mineralisiertes Kollagen ahmt in erster Nährung gut die Zusammensetzung der extrazellulären Knochenmatrix nach. Mit verschiedenen Methoden lassen sich eine ganze Reihe unterschiedlicher Implantatmaterialien daraus herstellen, welche interessante Materialeigenschaften haben und sich in zellbiologischen und tierexperimentellen Studien bewährt haben. Aufbauend auf mineralisiertem Kollagen können folglich für diverse medizinische Anforderungen maßgeschneiderte Lösungen angeboten werden – sowohl für die klassische Defektfüllung mit einem bloßen (resorbierbaren) Implantat, als auch für die Gewebe-Vorkultivierung im Sinne des Tissue Engineering.

5 Danksagung

Die hier beschriebenen Arbeiten sind zum Teil im Rahmen zweier vom BMBF geförderten Forschungs-Projekte zusammen mit der Firma BIOMET Merck Biomaterials GmbH, Darmstadt, durchgeführt worden. Weiterhin danken wir dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für finanzielle Unterstützung. An den vorgestellten Studien waren außerdem unsere KollegInnen Dr. Anne Bernhardt, Dr. Jens-Hilmar Bradt, Dr. Rainer Burth, Marlen Eckert, Dr. Birgit Knepper-Nicolai, Dr. Ulla König, Dr. Monika Kruse de Pacheco, Anja Reiband, Antje Reinstorf und Ortrud Zieschang beteiligt.

Literatur

[1] W. Pompe, M. Gelinsky: *Biological Materials: Failure of Bone and Teeth*. In: K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan (Hrsg.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Bd. 1, S. 580-584. Elsevier (Pergamon), Oxford 2001.

[2] J.-H. Bradt, M. Mertig, A. Teresiak, W. Pompe: Biomimetic Mineralization of Collagen by Combined Fibril Assembly and Calcium Phosphate Formation. *Chem. Mater.* 1999, *11*, 2694-2701.

[3] J.-H. Bradt, K. Weis, W. Pompe: *Verfahren zur Herstellung von mineralisierten Kollagenfibrillen und deren Verwendung als Knochenersatzwerkstoff*. Patente EP 0945146/7 (1999) und US 6384196/7 (2002)

[4] R. Burth, M. Gelinsky, W. Pompe: Collagen-Hydroxyapatite Tapes – a new Implant Material. *Tech. Textile* 1999, *8*, 20-21.

[5] M. Gelinsky, R. Burth, B. Knepper-Nicolai, W. Pompe, U. Hempel, A. Sewing, M. Dard: *Collagen-Hydroxyapatite-Tapes*. 15th European Conference on Biomaterials, Arcachon/Bordeaux (Frankreich) 8.-12. 9. 1999.

[6] H. Schliephake, T. Tavassol, M. Gelinsky, M. Dard, A. Sewing, W. Pompe: Use of a mineralized collagen membrane to enhance repair of calvarial defects in rats. *Clin. Oral Implan. Res.* 2004, *15*, 112-118.

[7] B. Burmeister, M. Gelinsky, M. Poppe, U. Hempel, A. Blank, G. Lauer: *Comparison of static and perfusion culture conditions on proliferation and differentiation of three osteoblastic cell types, cultured on mineralised collagen membranes.* Jahrestagung der European Life Scientist Organization, Dresden 20.-24. 9. 2003.

[8] A. Reiband, M. Gelinsky, G. Lauer, W. Pompe: *New collagen-membranes for tissue engineering of oral mucosa.* Strategies in Tissue Engineering, Würzburg 17.-19. 6. 2004.

[9] M. Gelinsky, U. König, A. Sewing, W. Pompe: Poröse Scaffolds aus mineralisiertem Kollagen – ein biomimetisches Knochenersatzmaterial. *Materialwiss. Werkstofftech.* 2004, *35*, 229-233.

[10] B. Burmeister, H. Domaschke, M. Gelinsky, A. Rösen-Wolff, Th. Hanke, W. Pompe: *Co-culture of osteoblasts and osteoclasts on resorbable mineralised collagen scaffolds: establishment of an in vitro-model of bone remodeling.* IV. European Cells and Materials Conference (Tissue Engineering of Bone), Davos (Schweiz) 30. 6.-2. 7. 2003. Abstrakt publiziert in: *Eur. Cells Mater.* 2003, *5, Suppl. 2*, 18-19.

[11] B. Knepper-Nicolai, A. Reinstorf, I. Hofinger, K. Flade, R. Wenz, W. Pompe: Influence of osteocalcin and collagen I on the mechanical and biological properties of Biocement D. *Biomol. Eng.* 2002, *19*, 227-231.

[12] R. Mai, A. Reinstorf, E. Pilling, G. Lauer, M. Gelinsky, U. Eckelt: Frei modellierbare Hydroxylapatit-Kollagen-Komposite zur Sanierung ossärer Defekte. *Z. Mund Kiefer Gesichtschir.* (angenommen)

[13] A. Reinstorf, M. Ruhnow, M. Gelinsky, W. Pompe, U. Hempel, K.-W. Wenzel, P. Simon: Phosphoserine – a convenient compound for modification of calcium phosphate bone cement collagen composites. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2004, *15*, 451-455.

[14] U. Hempel, M. Poppe, A. Reinstorf, U. Geißler, M. Gelinsky, W. Pompe, K.-W. Wenzel: Proliferation and differentiation of osteoblasts on Biocement D modified with collagen type I and citric acid. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* (im Druck)

[15] W. Pompe, H. Worch, M. Epple, W. Friess, M. Gelinsky, P. Greil, U. Hempel, D. Scharnweber, K. Schulte: Functionally graded materials for biomedical applications. *Mater. Sci. Eng. A* 2003, *362*, 40-60.

Experimentelle und Virtuelle Produktentwicklung in der Medizin

Hendrik KLEIN, Klaus BRÖKEL

Universität Rostock

Abstract

Methoden des Computer Aided Engineering (CAE) haben in den vergangenen Jahren auch in der Medizin Einzug gehalten. Ausgehend von digitalisierten Knochenmodellen, die aus Daten der Computertomographie (CT), der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) oder von Röntgenaufnahmen generiert wurden können angepasste Prothesen konstruiert werden. Mit Hilfe dieser 3D-CAD-Modelle können Festigkeitsuntersuchungen an Prothesen sowie an Teilen des Knochenapparates wie Femur, Becken und Wirbelsäule durchgeführt werden. Die Entwicklung ist soweit fortgeschritten, dass z. B. komplizierte chirurgische Eingriffe am menschlichen Schädel vor der Operation simuliert bzw. trainiert werden können. Momentan ist es jedoch den Spezialisten vorbehalten, die Möglichkeiten des CAE gezielt und unter hohem Zeitaufwand in der Medizin einzusetzen. Deshalb ist es notwendig, Prozesse in der Entwicklungskette zu automatisieren bzw. durch neuere Tools des CAE zu ersetzen.

Keywords

Computer Aided Design (CAD), Medical Engineering, Simulation, Fracture

1 Einleitung

Das Ziel dieses Beitrags ist es, die geometrisch-topologisch orientierten Modellierungsverfahren und ihre Anwendbarkeit auf die menschliche Orbita (knöcherner Apparat der Augenhöhle) zu diskutieren. Dabei soll der sich anschließende Einsatz der Finite-Element-Methode (FEM) für die Simulation komplizierter Frakturen des Mittelgesichts berücksichtigt werden.

Die heute verwendeten Verfahren zur Digitalisierung von Knochen und Gewebe sind bei der geometrischen Kompliziertheit des menschlichen Schädels nicht anwendbar, bzw. sie sind bei der Modellgenerierung infolge der Größe und schlechten Übersichtlichkeit des Punktewolke speziell im Inneren des Schädels schwer handhabbar und zeitaufwendig. Die Weiterverwendung der generierten CAD-Modelle für Finite Element Simulationen stellt im Hinblick auf topologische Richtigkeit und geometrische Genauigkeit zusätzlich hohe Anforderungen an

das Modell. Die bisher verbreitete Verwendung der CT zur Digitalisierung von Knochen ist aufgrund ihres geringen Auflösungsvermögens für die detailgetreue Modellierung menschlicher Schädel ungeeignet. Aufgrund dessen sollen ein oder mehrere generische und gleichzeitig parametrisierte CAD-Modelle entwickelt werden. Diese können flexibel an die konkrete Schädelform des Individuums angepasst werden, um schnell und einfach ein geometrisch-stoffliches Modell für Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Auf diese Art und Weise sollte es möglich sein, FEM-taugliche 3D-CAD-Modelle zu generieren, um Frakturen des Mittelgesichts und ihre Ursachen erklären zu können.

2 Motivation

Mittelgesichtsfrakturen werden in Frakturen des knöchernen Nasenbeins, des Oberkiefers und des Jochbeinmassivs bzw. Jochbogens eingeteilt. Neben diesen Brüchen gibt es auch isolierte und kombinierte Frakturen der Orbitawände, die einer besonderen Betrachtung bedürfen. Isolierte Frakturen des Orbitabodens wurde in [1] unter dem Terminus „blow-out fracture" bekannt.

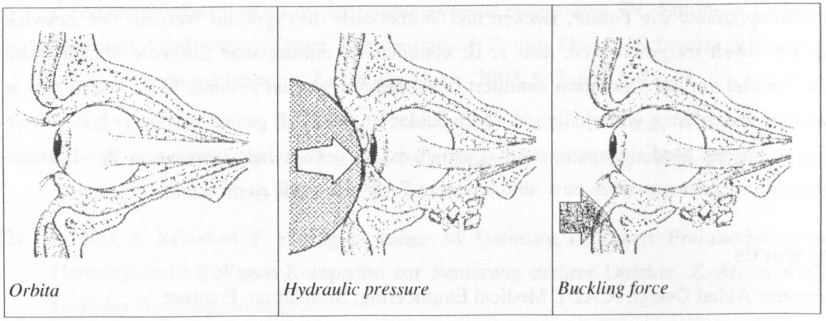


Abb. 1: Versagenstheorien der Orbita nach [3]

Über die Ursachen von Verletzungen im Gesichtsbereich liegen zahlreiche Statistiken vor. Als Hauptursachen sind hier Verkehrsunfälle, Freizeitunfälle, Sportunfälle, häusliche Unfälle und Gesichtverletzungen durch Gewaltanwendung zu nennen. Ziel der Versorgung aller Gesichtsschädelverletzungen ist heute die möglichst vollständige ästhetische und funktionelle Rehabilitation der Patienten mit Wiederherstellung des äußeren Erscheinungsbildes, der Mimik, der Sensibilität, sowie der Kau-, Schluck-, Atemwegs- und Sehfunktion.

Als Gründe für das Versagen der Orbitawände werden die „hydraulic-pressure" und die „buckling-force" Theorie postuliert (Abb. 1). Die Überdrucktheorie (hydraulic-pressure) [2] geht von einer Kraftübertragung durch den inkompressiblen Orbitainhalt aus. Der durch ein stumpfes Trauma auf das Auge gesteigerte, sich allseits ausbreitende intraorbitale Druck führt

demnach zur Fraktur des dünnen Orbitabodens. Kritiker bemängelten das Fehlen schwerwiegender Augenverletzungen und stellten die Knochentransmissionstheorie (buckling-force) [4] auf. Hierbei kommt es durch direkte Kraftweiterleitung, von den bei einem stumpfen Trauma exponierten Orbitaränder auf die Orbitawände, an typischen Stellen zu Biegebrüchen. Beide Theorien wurden in neueren Experimenten [5] an Leichenschädeln nachgestellt. Sowohl Überdrucktheorie als auch Knochentransmissionstheorie führten bei definierten Kräften zur Fraktur des Orbitabodens, hatten aber unterschiedliche Verletzungsmuster zur Folge.

Diese Versuche dürften in der heutigen Zeit aus medicolegalen und ethnischen Gründen nicht mehr zu vertreten sein. Die Ursachen und Mechanismen die zu Frakturen der Orbita führen können, sind gut untersucht und dokumentiert. Die vorliegenden Ergebnisse und Fallbeispiele machen es möglich, Vergleiche zwischen virtuellen Frakturgeschehnissen und der Wirklichkeit zu unternehmen und so ein naturgetreues parametergestütztes virtuelles Orbitamodell zu erzeugen. Dies soll ein erster Ansatz für die Entwicklung eines kompletten virtuellen Schädelmodells sein, um später komplexe, den gesamten Schädel einbeziehende Frakturgeschehnisse und deren Mechanismen zu simulieren.

3 Vorarbeiten

Seit einigen Jahren erfolgt an der Universität Rostock eine rege Zusammenarbeit des Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, der Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde und des Instituts für Biomedizinische Technik. In diesem Rahmen wurde versucht, einfach und schnell digitale Kopien menschlicher Schädel [6] zu erzeugen. Dabei kamen unterschiedliche Verfahren für die Rückführung im CAD-System zu Anwendung. Ziel war es, aus CT-Datensätzen ein FE-Modell zu erzeugen.

Zur Lösung dieser Aufgabe wurden direkte und indirekte Verfahren angewandt. Ausgangspunkt war die Punktewolke eines CT-Datensatzes. Dieser entspricht einer Grauwertemenge gemessen in Hounsfieldeinheiten welche aus Voxeln im Raum besteht. Der Grauwert korrespondiert mit der Dichte des durchstrahlten Materials und erlaubt dadurch Rückschlüsse, ob es sich um Knochen, Knorpel oder Gewebe handelt. Die Auflösung des zu diesen Untersuchungen verwendeten klinischen Computertomographen betrug 1,2mm. Bei der Anwendung der direkten Verfahren wurde versucht, aus der Punktewolke ein FE-Netz zu generieren. Die erforderliche Nachbearbeitung (Glättung der Oberflächen) war sehr zeitintensiv bzw. auf Grund der Komplexität der Geometrie in einigen Bereichen unmöglich. Die Ergebnisse erwiesen sich für sinnvolle Berechnungen als weitgehend unbrauchbar.

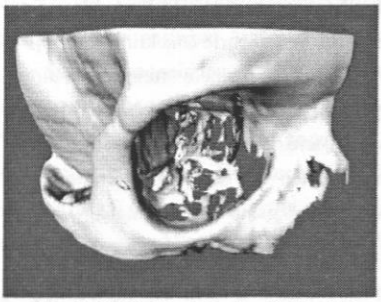


Abb. 2: CAD-Modelle der Orbita [6]

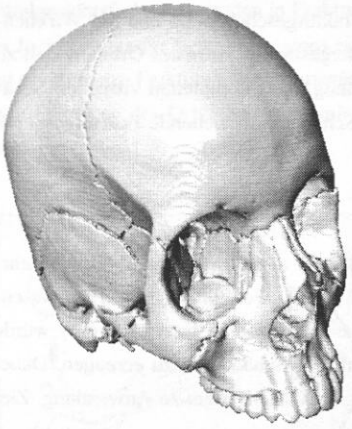


Abb. 3: Schädelmodell erstellt mit MIMICS [7]

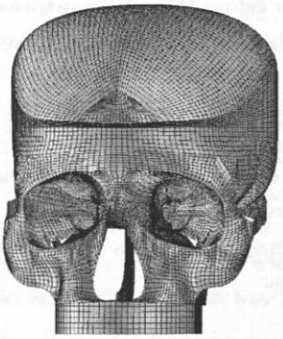


Abb.4: FE-Schalen-Modell [7]

Bei den indirekten Verfahren (Abb. 2) wurde mit Hilfe von verschiedenen mathematischen Algorithmen aus der Voxelwolke ein 3D-CAD-Modell generiert, um dieses als Grundlage für FE-Analysen zu verwenden. Auch die indirekten Verfahren lieferten keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Grund hierfür ist die sehr komplexe Geometrie des Schädels (kleine Knochen, Hohlräume, dünne Knochen). Ein weiteres Hindernis stellt der zeitliche Aufwand dar.

Versuche der automatischen Generierung von 3D-CAD-Modell aus CT-Daten mit der kommerziellen Software MIMICS (Materialise's Interactive Medical Image Control System) von Materialise lieferten entgegen bisheriger Untersuchungen viel versprechende Ergebnisse (Abb. 3). Hierbei wurde ein Schädelabguss mit einer verbesserten Auflösung von 0.5mm gescannt. Ein weiterer Vorteil bestand in der sehr scharfen Grenzschicht, weil nur das Modell des knöchernen Schädels gescannt wurde und damit keine weitere Filterung der Punktewolke vorgenommen werden musste. Probleme, die bei allen bisher unternommen Anstrengungen auftraten und sie für die endgültige Lösung der eingangs erwähnten Aufgabe unbrauchbar machen sind der „partial-volume" Effekt und die geringe Auflösung der CT. Der „partial-volume" Effekt entsteht dadurch, dass der Grauwert eines Voxels einen Mittelwert der Strahlungsabsorption des in ihm liegenden Materials darstellt. In Randbereichen führt dies zu Unschärfen, welche sich nur dort abmildern lassen, wo sich gleiches Material über Gebiete erstreckt, die größer als das Auflösungsvermögen der CT sind. Die geringe Auflösung bedingt ein weiteres Problem. In Bereichen der

Orbita treten Knochenstrukturen mit einer Dicke von 0.5mm auf. Diese können nur hinreichend genau abgebildet werden, wenn die Auflösung der CT deutlich höher ist. Unabhängig zu den vorangegangenen Untersuchungen wurde von dem Institut für Biomedizinische Technik ein nicht patientenspezifisches FE-Modell aus Schalenelementen (Abb. 4) nach mazerierten Schädelpräparaten erstellt [7]. Das Schädelmodell entstand nach Vermessung einzelner Komponenten des Schädels mit Hilfe eines Koordinatenmesstisches. Die Dicke für die einzelnen Bestandteile des Schädels wurde stückweise konstant gesetzt. Mit statischen Randbedingungen wurden mehrere Lastfälle untersucht, die verschiedene Varianten der Lastaufbringung (buckling-force und hydraulic-pressure) darstellten. Der Schädel wurde im Bereich des Foramen magnum eingespannt betrachtet. Anhand der berechneten Spannungsverteilungen konnten qualitative Rückschlüsse auf die Gültigkeit der verschiedenen Theorien (hydraulic-pressure-theory, buckling-force-theory) gezogen werden. Bei Lastaufbringung auf den Orbitarand ergaben sich Spannungsspitzen in einem Bereich der Orbita, der etwa demjenigen entspricht, wo Frakturen zu erwarten sind.

Für einen quantitativen Vergleich sind weiterführende Untersuchungen erforderlich. So muss das Auge und das zugehörige Gewebe (Muskeln/Fett) mit modelliert werden, um Aussagen über die Druckverteilung im Orbitabereich zu erhalten.

4 Durchführung

Für die Erfüllung der Aufgabe sollen natürliche Daten der Orbita und deren Umgebung anhand von Schädelpräparaten erfasst werden. Dadurch kann die optimale Datenmenge, die zur Charakterisierung dieser Struktur notwendig ist, ermittelt werden. Für die Umsetzung der eingangs vorgestellten parameterbehafteten Technik werden Orbitaenormen, welche das Alter und das Geschlecht des Individuums berücksichtigen, zugrunde gelegt.

Um ein parameterbehaftetes Modell zu erzeugen, werden digitalisierte Kopien zugrunde gelegt. Diese werden durch optisches Vermessen und aus CT-Daten, welche aus schon vorliegenden computertomographischen Datensätzen des medizinischen Alltags stammen, die keine zusätzliche Strahlenbelastung für Patienten bedeuten, gewonnen. Die digitalisierten Kopien dienen als Referenzmodell für das zu entwickelnde CAD-Modell. Mit Hilfe eines parametrischen Ansatzes wird ein Skelettmodell (im Sinne des Computer Aided Design) entwickelt, das aus Bezugspunkte und Kurven besteht. Anschließend werden die Querschnitte der Knochen in verschiedenen Bereichen modelliert. Das generierte Kurvengerüst soll alle notwendigen Parameter zur Anpassung des Modells an spezielle Patienten beinhalten und abhängig von diesen alle Transformationen erlauben. Mit Hilfe von Freiformflächen wird die Oberfläche auf das Kurvenskelett modelliert. Zuerst werden grobe Strukturen abgebildet und überprüft, wie sich die einzelnen Flächen bei der Variation des Skeletts verhalten. Bei hinreichend genauer Darstellung wird der Detaillierungsgrad schrittweise erhöht, bis das parametrische Modell mit allen relevanten Feinheiten generiert ist. Anschließend wird das eingeschlossene

Volumen in ein aus mehreren Teilvolumina bestehendes 3D-CAD-Modell überführt. Die Möglichkeit der Überführung in ein Hybridmodell, einer Kombination aus Flächen und Volumina, wird an dieser Stelle mit betrachtet, denn die Notwendigkeit als Ergebnis ein vernetzungsfähiges Modell für finite Element Berechnungen zur Verfügung zu stellen setzt eine Adaption des Modells dafür voraus. Hierzu ist es sinnvoll sehr dünne Knochenbereiche als Flächen abzubilden, weil dünne Volumen aufwendig zu vernetzen sind und einen höheren Rechenaufwand als Schalenmodelle nach sich ziehen, ohne die Genauigkeit des Ergebnisses signifikant zu beeinflussen. Als Ergebnis steht ein 3D-CAD-Volumenmodell (eventuell Hybridmodell) zur Verfügung, welches nur durch Ändern einzelner globaler Parameter (Skelettparameter) an den jeweiligen Einzelfall (Patient) angepasst werden kann.

Für das virtuelle Abbild der Orbita muss das geometrische Modell mit den entsprechenden Materialeigenschaften beaufschlagt werden. Bei der Bestimmung dieser Kennwerte sollen Unterschiede zwischen den einzelnen Knochenstrukturen, wie Jochbogen, Orbitaboden oder Margo infrarobitale, sowie Unterschiede zwischen den Kennwerten von postmortem und mazerierten Knochenstrukturen durch Versuche an Tiermodellen helfen. Dabei sollen Kennwertfaktoren ermittelt werden, die auf die Orbita des Menschen übertragen werden können. Mit diesen Faktoren sind dann nur noch wenigen Versuche an humanen Knochenpräparaten notwendig, um die Eigenschaften des anistropen viskolastischen Knochenmaterials zu beschreiben. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang die Probenkonditionierung, nicht bei Raumtemperatur, sondern bei 37° Celsius und 100 % Luftfeuchtigkeit.

Neben der virtuellen Orbita werden für eine erfolgreiche FE-Analyse reale Randbedingungen benötigt. Hierzu werden Rapid-Prototyping-Modelle angefertigt. Mit diesen können verschiedene Last- und Auflagerbedingungen untersucht werden. Verformungsmessungen und Rissuntersuchungen zeigen versagenskritische Bereiche nach den einzelnen Belastungstheorien. Auf diese Weise erfolgt eine erste Verifikation der FE-Analyse. Der Vorteil der Rapid-Prototyping-Modelle besteht in ihrer praktisch unbegrenzten Anzahl. Dadurch müssen nur in sehr geringem Umfang Untersuchungen an vom Menschen gewonnenen Proben durchgeführt werden. Weiterhin helfen Rapid-Prototyping-Modelle beim ermitteln der Beziehungen zwischen der Geometrie und den Metadaten. Die Ausprägung einzelner globaler Parameter kann auf diesem Weg sehr detailliert untersucht werden.
Bei den experimentellen und virtuellen Untersuchungen werden hauptsächlich frontal auf den Schädel einwirkende Kräfte betrachtet. Zu klärende Punkte sind Orbitainhalt, Lastannahmen und Fallbeispiele. In [4] wurde experimentell eine Arbeit von 1,54 Joule für die „buckling-force" und 1,22 Joule für die „hydraulic pressure" Theorie ermittelt, welche zur Fraktur an Leichenschädeln führte. Mit diesen Werten sollen im Versuch Unfallmechanismen anhand von Lastbeispielen nachgestellt werden, um die wirklichkeitsgetreue Reaktion des Modells zu überprüfen. Um zu vergleichbaren Bedingungen bei vergleichenden Untersuchungen nach der „buckling-force" und der „hydraulic-pressure" Theorie zu gelangen sind diese Detailuntersu-

chungen wichtig. Angrenzende Weichteile wie Auge, Fettgewebe und Muskeln werden näherungsweise nach Auswertung von CT-Daten modelliert werden. Auf diese Art kann die ungleichförmige Lastverteilung in der Orbita infolge Eindrückens des inkompressiblen Auges ermittelt werden.

Um die virtuelle Orbita für die FE-Analyse vorzubereiten, stellen Preprozessoren leistungsfähige Funktionen zur automatischen Netzgenerierung und zur Definition von Elementeigenschaften (Materialdaten), Lasten und Randbedingungen zur Verfügung. Die zur Anwendung kommenden Solver beinhalten sowohl explizite als auch implizite Lösungsverfahren, wobei letztere für transiente Stoßvorgänge besonders geeignet sind. Anschließend werden systematische Untersuchungen durchgeführt, um Modellparameter wie Netzfeinheit, Elementtyp und Solver-Parameter in einer Reihe von Testmodellen zu evaluieren. Danach erfolgt die Nachrechnung der experimentellen Versuche als ein erster Schritt zu einer validen FE-Analyse. Auf diese Weise kann die Rekonstruktion der Geometrie und die Wiedergabe des Materialgesetzes in der FE-Analyse überprüft werden.

Durch diese Untersuchungen sollen Frakturlinien charakterisiert werden, die durch Krafteinwirkung auf die Orbita und angrenzender Strukturen hervorgerufen werden. Die Neuheit dieser Methode ist, ein exaktes naturnah reagierendes Modell zu generieren, mit welchem Lasteinwirkungen simuliert werden können. Das bereitgestellte Verfahren gibt Aufschluss über den Wirkungsmechanismus bei Verletzungen des knöchernen Apparates, in diesem Falle des Schädels.

Durch Generierung individueller Schädelmodelle ist es möglich, Untersuchungen von Osteosynthesemethoden und -materialen durchzuführen. Auf diese Weise kann die Lage von Osteosyntheseankern und Bohrlöchern für eine maximale Belastbarkeit der Gesamtstruktur optimiert werden. Weiterhin können Kräfte, welche auf die Osteosynthesematerialschrauben und das Osteosynthesematerial wirken, berechnet werden. Die Anpassung von Implantaten hinsichtlich Geometrie und Materialwahl wird mit Hilfe dieses Verfahrens möglich.
Im Hinblick auf Unfallverhütung und Unfallschutz können durch Simulationen typischer Unfallsituationen schon bei der Konstruktion Mängel erkannt und so eine erhebliche Kosten- und Zeitersparnis erzielt werden. Bei der Optimierung von Schutzbrillen und Helmen kann nicht nur der Schutz überprüft sondern auch die durch die Kraftübertragung der Schutzmaterialien auf Schädel möglichen Unfallpotentiale ermittelt werden.
Ein weiteres Anwendungsgebiet ist Ursachenklärung von Orbitafrakturen. Durch Simulation unterschiedlicher Belastungsszenarien kann dieses Verfahren außer zur Klärung von Unfallursachen auch der Aufklärung körperlicher Gewalteinwirkung führen.

5 Zusammenfassung

Die heute zur Verfügung stehenden Verfahren zur Digitalisierung scheinen bei der Anwendung auf den menschlichen Schädel ungeeignet. Besonders im Hinblick auf die nachfolgende FE-Analyse ist die Flächenrückführung mittels Triangulisation nicht anwendbar, weil hierbei durch die Dichte der Punktewolke gleichzeitig die minimale Elementanzahl bei einer automatischen Vernetzung festlegt wird. Aufgrund dessen soll ein generisches parametrisiertes CAD-Modell entwickelt werden, welches flexibel an die individuelle Schädelform angepasst werden kann. Durch die Variation der beschreibenden Parameter kann in kurzer Zeit eine vollständige geometrisch-stoffliche Beschreibung individueller Schädelteile generiert werden.

Durch den Vergleich der Originalgeometrie mit Rapid-Prototyping-Modellen erfolgt die Verifikation dieses Verfahrens. Weiterhin dienen die RP-Modelle Stoßversuchen, bei denen die Randbedingungen für die FE-Analyse untersucht werden. Mit Typischen Verletzungsmustern und den Ergebnissen der Stoßversuche können die FE-Simulationen überprüft werden. Anschließend können spezielle Blow-Out-Frakturen mit verschiedenen Belastungen simuliert und durch Vergleich mit den originalen Verletzungsbildern Rückschlüsse auf die Ursache der Verletzung gezogen werden.

Literatur

[1] Converse, J M, Smith, B: Enophthalmos and Diplopia in Fractures of the Orbital Floor, British Journal of Plastic Surgery, 9, (1957), 265-274

[2] Pfeiffer, R L: Traumatic Endophthalmus Archives of Ophthalmology, (1943)

[3] Boenninghaus, H.G.: Hals-Nasen-Ohrenheilkunde für Studierende der Medizin. Springer-Verlag, Berlin, (1993), 197-198

[4] King, E F: VI. Diseases of the Orbit and Sphenoidal Sinus, 1. Fractures of the Orbit, Transactions of the Ophthalmic Society of the United Kingdom, 64, (1944), 134-139

[5] Ahmad, F, Kirkpatrick, W N, Lyne, J, Urdang, M, Garey, L J, Waterhouse, N: Strain gauge biomechanical evaluation of forces in orbital floor fractures. Br J Past Surg., 56, (2003), 3-9.

[6] Michele, J: Generierung eines finiten Elementmodells des Gesichtsschädels unter besonderer Berücksichtigung der Orbita. Projektarbeit am IFK der Universität Rostock, (2003)

[7] Fritsche, A: Erstellung eines verallgemeinerten Finite-Elemente-Modells zur Untersuchung von Orbitabodenfrakturen, Projektarbeit am IBMT der Universität Rostock, (2003)

Experimentelle und virtuelle Produktentwicklung in der Zahnprothetik – Produktionstechnische Aspekte

Christine SCHÖNE, Steffen SCHREIBER

Technische Universität Dresden

Keywords

Reverse Engineering, Freiformflächen, Zahnprothetik, CAD/CAM, Produktionstechnik

1 Einleitung

Reverse Engineering beschreibt im engeren Sinne den Prozess der 3D-Digitalisierung von Werkstücken mit Freiformflächen und die Aufbereitung dieser 3D-Punkteinformationen zu CAD-Modellen [1,2]. Eigene Erfahrungen bei der Nutzung leistungsfähiger 3D-Digitalisiertechnik belegen, dass Effekte der 3D-Datenerfassung nur in Verbindung mit einer qualifizierten und problembezogenen Datenaufbereitung und Datennutzung in der weiterführenden rechnergestützten Arbeitsweise wirksam werden [2,3,4,5,6]. Werkstücke mit Freiformflächen stellen heute nach wie vor hohe Ansprüche an das Know-how der Bearbeiter und an die Soft- und Hardwarekomponenten bei der Datenerfassung, CAD-Modellierung, Fertigungsvorbereitung und Fertigung.

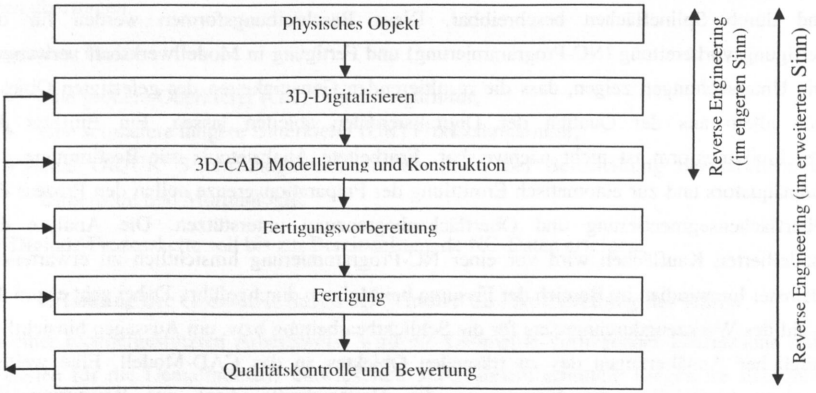


Abb. 1: Elemente des Reverse Engineering im engeren und erweiterten Sinn

Im erweiterten Sinn muss man daher Reverse Engineering betrachten, wenn die digitalisierten Daten nicht nur unter Einhaltung geforderter Randbedingungen zu CAD-

Modellen umgewandelt werden. Ebenso wichtig ist, dass diese CAD-Beschreibung erfolgreich der Fertigungsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrolle beim jeweiligen Anwender stand hält (Abbildung 1). Diese komplexen Zusammenhänge in der Zahnprothetik erfolgreich zu begleiten und zu fördern, bildet seit 1999 einen Forschungs- und Transferschwerpunkt des Lehrstuhls Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik in Zusammenarbeit mit der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der TU Dresden und der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik in Berlin. Aktuelle Aufgaben bei der Erweiterung des „digitalen Formenparks" zur Zahnformenfertigung bei der Firma Heraeus Kulzer zeigen recht deutlich die enge Verknüpfung zwischen Datenerfassung, Datenaufbereitung, Modellierung, Fertigung und Bewertung der Ergebnisse.

2 Reverse Engineering-CAM-Prozesskette für festsitzende zahnärztliche Versorgungen [7,8,9.10]

Da Grundlagenuntersuchungen bislang fehlen, zielt das Forschungsprojekt auf die Entwicklung einer universell einsetzbaren Reverse-Engineering-CAM-Prozesskette „Digitalisieren - CAD - CAM" für den Bereich der Modellierung, Konstruktion und Fertigung festsitzender zahnärztlich-prothetischer Restaurationen, unter besonderer Beachtung zahnärztlicher Aspekte. Neben einer unkomplizierten Handhabung der Systeme, qualitativen Aspekten bei der Modellierung spielen insbesondere die Fertigungstoleranzen für eine Akzeptanz von CAD/CAM gefertigtem festsitzendem Zahnersatz eine entscheidende Rolle.

Eine Untersuchung befasst sich mit der Bewertung von mit unterschiedlichen dentalen Scannern gewonnenen Punktewolken hinsichtlich ihrer Eignung für unterschiedliche Oberflächenrepräsentationen. Prinzipiell sind die Zahnoberflächen durch Triangulationsdaten und durch Splineflächen beschreibbar. Diese Beschreibungsformen werden für die Fertigungsvorbereitung (NC-Programmierung) und Fertigung in Modellwerkstoff verwendet. Die Untersuchungen zeigen, dass die resultierenden Genauigkeiten der gefertigten Objekte sich allein aus der Qualität der Digitalisierdaten ableiten lassen. Ein Einfluss der Beschreibungsform ist nicht nachweisbar. Erarbeitete Analysetools zur Bestimmung des Zahnäquators und zur automatisch Ermittlung der Präparationsgrenze sollen den Prozess der Oberflächensegmentierung und Oberflächenbegrenzung unterstützen. Die Analyse der modellierten Kauflächen wird vor einer NC-Programmierung hinsichtlich zu erwartender kleinster Innenradien im Bereich der Fissuren bei Molaren durchgeführt. Dabei geht es um die Wahl des Werkzeugdurchmessers für die Schlichtbearbeitung bzw. um Aussagen hinsichtlich möglicher Annäherungen des zu fräsenden Objektes an das CAD-Modell. Eine weitere Analyse hinsichtlich der Berechnung der Hinterschnitte dient zur Bewertung der erforderlichen Achsen beim Fräsen (3-achs-Fräsen oder 5-achs-Fräsen).

Ein Untersuchungsgegenstand befasst sich mit der Erarbeitung der Fertigungsparameter, der sinnvollen Abfolge von Schruppen und Schlichten, der Werkzeugwahl und der Wahl des Fräsregimes.

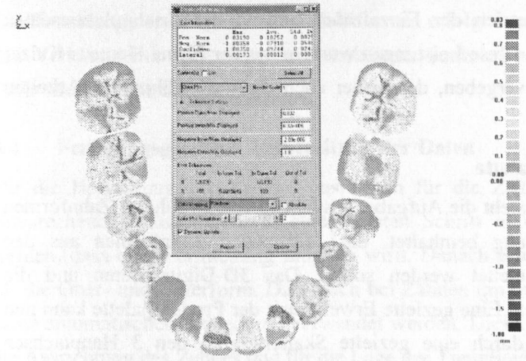


Abb.2: Abweichungen zwischen CAD-Modell eines gefrästen Oberkiefer(OK)- und Unterkiefer(UK)-Prüfmodells das wiederum gemessen wurde im Vergleich zum CAD-Modell

3 Erweiterung des Formenparks Heraeus Kulzer

3.1 Ausgangspunkt

Für die gezielte Erweiterung eines bestehenden Spektrums der PREMIUM-Zahnlinie sind für den Bereich Formenbau am Heraeus Kulzer Zahnproduktionsstandort Wasserburg der Einsatz neuer Technologien vorzubereiten. Ziel ist es, die Entwicklung neuer Zahnlinien hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität zu optimieren. Die neuen PREMIUM Zahnformen werden den Marktwünschen entsprechend in Form und Größe ermittelt und über Skalierung der bereits vorhandenen STL Daten erstellt. Die Zwischenformen werden ebenfalls aus den vorhandenen Daten übertragen.

Vorgesehen sind:

- eine größere Oberkiefer (OK) Frontzahngarnitur,
- eine schmalere längere Unterkiefer (UK) Frontzahngarnitur,
- eine OK/UK Seitenzahngarnitur als Kurzform bei Beibehaltung der okklusalen Dimension und Morphologie.

Die Digitale Prozesskette soll bis zur Bereitstellung de NC-Daten erfolgen.

3.2 Erfassung der Geometrie durch 3D-Scannen und Aufbereitung der Daten

Bei einer rechnergestützten Arbeitsweise wird die Geometrie vorliegender Einzelzähne mit speziellen für die Dentalindustrie entwickelten 3D-Scannern ermittelt. Liegen im Ergebnis des Scannens digitale 3D-Informationen über diese 3D-Objekte vor, z.B. in Form von Punktewolken, können diese in einer weiterführenden Prozesskette verarbeitet werden. Für eine visuelle Bewertung der Digitalisierergebnisse wird die Punktewolke trianguliert. Leistungsfähige Algorithmen stehen für die Triangulation zur Verfügung. Eine nachträgliche Filterung der Punktewolke wird ausgeführt um das Rauschen zu verringern. Nachfolgende

lokale Änderungen an den Geometrien der Einzelzähne anhand der Triangulationsdaten liefern dann wunschgemäße Daten. Diese Leistungen wurden von der Firma Heraeus Kulzer an einen CAD/CAM-Dienstleister vergeben, der bisher auch die weiterführenden Arbeiten ausführt.

3.3 Erweiterung der Produktpalette

Aufgrund von Marktforderungen besteht die Aufgabe, ausgehend von bewährten Zahnformen neue zu realisieren. Die Zielsetzung beinhaltet, dass die neuen Zahnformen aus den vorliegenden digitalen Daten abgeleitet werden sollen. Das 3D-Digitalisieren und die Aufbereitung der Daten soll entfallen. Eine gezielte Erweiterung der Produktpalette kann nun von vorliegenden 3D-Geometrien durch eine gezielte Skalierung in den 3 Hauptachsen erfolgen. Die korrespondierenden Zähne werden durch die Spiegelung um die jeweilige Hauptachse generiert. In Abbildung 3 sind die ursprünglichen Geometrien der oberen Frontzähne zusammen mit den neuen skalierten Geometrien dargestellt.

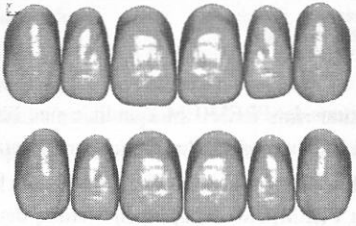
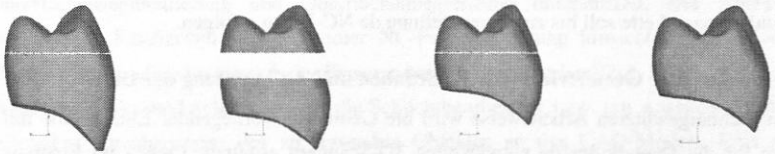


Abb.3: Neue Oberkiefer Frontzähne O8-13,12,11,21,22,23 (v.l.n.r.)
darunter Ausgangsgeometrie O6- 13,12,11,21,22,23 (v.l.n.r.)

Dieses Vorgehen zur Erweiterung der Zahnformen für Frontzähne ist bei Seitenzähnen nicht in jedem Fall anwendbar. Eine Skalierung führt zu einer Änderung der okklusalen Dimension. Die Ausprägung und die Tiefe der Fissuren auf der Kaufläche sollten auch nach einer Modelländerung erhalten bleiben. Für diese Zielsetzung wurde eine Abfolge erprobt, die diesen Forderungen gerecht wird. Nachfolgend sind in Abbildung 4 die einzelnen Schritte aufgezeigt



Trennung der Zahngeometrie annähernd am „Äquator"

Skalierung der unteren Objekthälfte

Zusammenführung der Bereiche, Maßkontrolle

Spalt schließen und Übergänge lokal glätten

Abb.4: Abfolge zur Verkleinerung der Seitenzähne unter Beibehaltung der okklusalen Dimension

Die Bewertung der neu generierten Zahnformen erfolgt durch den Leiter Produktentwicklung, den Verkaufsleiter und weiteren Mitarbeitern zunächst nur anhand der vorliegenden 3D-CAD-Modelle am Computer.

3.4 Fertigungsgerechte Aufbereitung der Daten

Für die Herstellung von Produktionsformen für die Zähne gilt es, die 3D-CAD-Modelle entsprechend aufzubereiten. In einem ersten Schritt muss die Geometrie so ausgerichtet werden, dass eine Formteilung möglich wird. Danach erfolgt die Festlegung der Trennlinie für die Ober- und Unterform. Da es sich bei Zähnen um organische Objekte handelt, können keine automatischen Prozeduren verwendet werden. Diese liefern lediglich Anhaltspunkte für die Ausrichtung des Zahnes und für die Lage der Trennlinie.

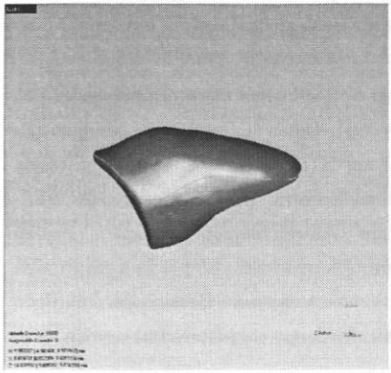


Abb.5: Ausgerichteter Frontzahn mit Trennlinie als Spline

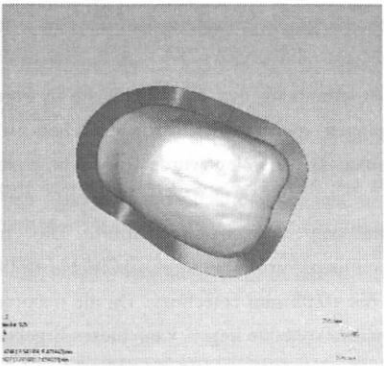
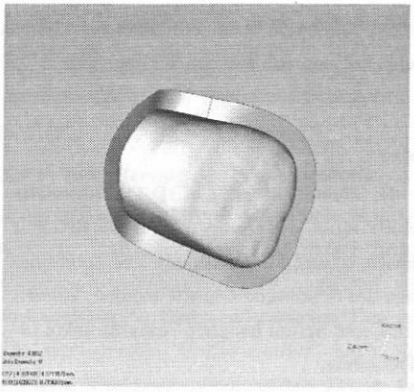


Abb.6: Zahnaußenform mit konstruierter Trennfläche

In einem nächsten Schritt wird die Trennfläche, die als Dichtfläche der Formenhälften und Zwischenformen fungiert anhand der festgelegten Trennlinie konstruiert. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass die Dichtflächen als Regelflächen mit einem Verlauf der Regelstrahlen normal zur Zahnoberfläche konstruiert werden. Erschwert wird diese Aufgabenstellung durch die 3D-Repräsentation der Zähne in Form von Triangulationsdaten. Aufgrund der besonderen Anforderungen an die Krümmungsstetigkeit der Dichtfläche wird diese als Splinefläche konstruiert. Die Teilung der Zahngeometrie in Ober- und Unterform erfolgt auf der Basis der Triangulationsdaten. Eine automatische Teilung versagt auch hier. Lediglich eine Vorselektion der Geometrie für eine Formteilung ist möglich, die dann noch manuell nachgearbeitet werden muss. In Abbildung 7 sind die Ober- und Unterform mit der Dichtfläche dargestellt. Zu beachten ist, dass die Zahngeometrie der Außenseite durch Triangulationsdaten repräsentiert wird, hingegen die Trennfläche und die beiden Zwischenformen als Splineflächen beschrieben werden.



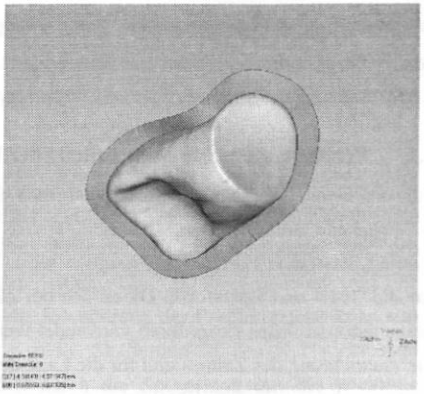


Abb.7: Oberform mit Dichtfläche Unterform mit Dichtfläche

Eine Beschreibung der Zahnoberfläche in Form von Splineflächen mit krümmungsstetigen Übergängen zwischen den Einzelflächen ist aus STL-Daten in wenigen Minuten zu erarbeiten. Dieser Weg wurde folgerichtig parallel zur STL-Beschreibung verfolgt. Eine Analyse der Splineflächenbeschreibung der Zahnaußenform im Vergleich zur STL-Beschreibung wurde durchgeführt. Die mittleren Abweichungen zwischen beiden Beschreibungsformen betragen –0.004 bis +0.006 mm. Als maximale Abweichungen wurden –0.04 bis +0.08 mm berechnet. Da die maximalen Abweichungen im Bereich der künftigen Approximalkontakte liegen, kann dieses Ergebnis als zufrieden stellend bewertet werden.

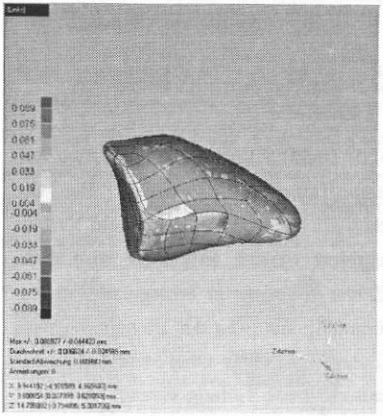


Abb.8: Abweichungen zwischen Splineflächen- und STL-Beschreibung

3.5 Fertigungsplanung und CNC-Fertigung

Die Fertigungsplanung und Fertigung erfolgt in zwei Stufen. Zunächst sollen die Formen für 14 Zähne in Modellwerkstoff gefräst werden. Dafür werden die Rohteile konstruiert, die Zahnformen mit den Dichtflächen eingebettet. Für jede Zahnform wird zunächst die kombinierte Beschreibung der Zahngeometrie durch STL-Daten und der Dichtfläche durch eine Splinefläche beibehalten. Es erfolgt die Auswahl der Werkzeuge, der Schnitttiefe, der Fräsbahnabstände, die Berechnung der Schrupp- und Schlichtbahnen sowie die Ausgabe der NC-Programme für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung. Die Fräsbearbeitung erfolgt auf einer 3-achs-Fräsmaschine vom Typ MICROMAT HSC 4V mit ANDRONIC 2000.

Für vergleichende Bewertungen wird eine Form ausgewählt und auf der Basis der erarbeiteten Splineflächen programmiert und gefräst. Im NC-Programmiersystem gestaltet sich die Handhabung der Splineflächen der Zahnaußenformen deutlich einfacher als auf Basis der STL-Datenbeschreibung. In einem weiteren Schritt erfolgt die CNC-Programmierung für die endgültigen Stahlformen.

3.6 Bewertung der Ergebnisse

Die gefrästen Probeformen aus Modellwerkstoff werden vom Formenbauer in der Firma Heraeus Kulzer bewerten. Dafür werden die Kriterien

- Rilligkeit der Negativform aufgrund des Fräsbahnabstandes
- Realisierte Detailliertheit der Oberfläche
- Güte und Passfähigkeit der Dichtfläche

für eine definitive Bewertung herangezogen. Sichtbare Rilligkeiten wurden durch die Wahl kleinerer Fräsbahnabstände bei der weiteren Arbeit beseitigt.

Es zeigte sich, dass die Probeform, die auf der Basis der Splineflächenbeschreibung programmiert und gefräst wurde, zwar eine sehr glatte Oberfläche aufweist, diese aber bei den Zahnformen nicht erwünscht ist. Im Unterschied zu Anforderungen aus dem Modellbau des Fahrzeugbaus sind hier Oberflächen mit allen vorher festgelegten Unregelmäßigkeiten gewünscht. Diese geforderte Qualität ist nur durch die Beschreibung der Oberfläche in Form von STL-Daten zu erzielen. Für die Realisierung kleinster Details ist zudem ein kleinstmöglicher Werkzeugdurchmesser für die Schlichtbearbeitung zu wählen.

Die in Modellwerkstoff gefrästen Probeformen wurden für die Herstellung von Modellzähnen benutzt. Diese Modellzähne wurden durch den Leiter Produktentwicklung, den Verkaufsleiter und weiteren Mitarbeitern der Firma Heraeus Kulzer erneut begutachtet. Aufgrund der Bewertung der realen 3D-Objekte ergaben sich nun erneute Änderungen an den Zahngeometrien der Frontzähne. Eine modifizierte Skalierung der Frontzähne wurde vereinbart. Hier zeigt sich deutlich, dass der Reverse Engineering Prozess erst als erfolgreich bezeichnet werden kann, wenn die herzustellenden Objekte den Kundenwünschen entsprechen.

3.7 Weiterführende Arbeiten

Weiterführende Arbeiten zielen auf die NC-Programmierung und CNC-Fertigung der Zahnformen in hochfesten hitze- und säurebeständigen Stahl. Da sich die Fertigungskosten in hohem Maße aus den Belegungszeiten der NC-Maschine ergeben, gilt es hier eine besondere Untersuchung durchzuführen hinsichtlich:

- Werkzeugauswahl hinsichtlich zu erzielender Standweg
- Frässtrategie für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung
- Frässtrategie für die Schlichtbearbeitung, um eine hohe Oberflächengüte zu erzielen und den manuellen Nachbearbeitungsaufwand zu minimieren
- Auswahl eines geeigneten NC-Programmiersystems
- Auswahl einer geeigneten CNC-Fräsmaschine
- Nachkalkulation der Kosten und Zeiten für die Prozesskette.

4 Zusammenfassung

Am Beispiel der Zahnprothetik konnte dargelegt werden, dass der Erfolg der virtuellen Produktentwicklung im hohem Maße von der Beherrschung der weiteren Elemente der rechnergestützten Prozesskette, der CAD-Modellierung, von produktionsvorbereitenden Arbeiten und der Fertigung selbst abhängen. Dabei ist es unerheblich ob es sich um eine Einzelfertigung, wie sie in der Zahnprothetik anzutreffen ist, oder um eine Serienfertigung handelt. Erst nach der Absolvierung der Prozesskette kann die Bewertung der Ergebnisse vorgenommen werden. Rücksprünge zu jedem Element in der Prozesskette können durchaus erforderlich sein.

Literatur

[1] Beyer,C.: Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten, Dissertation, TU Magdeburg, Fakultät Maschinenwesen, 2002

[2] Schöne,C., Carlsen, U., Schreiber,S.: Digitizing and Reverse Engineering, 33. International Conference on Computers and Industrial Engineering, Jeu, Korea, 25.-27.03.2004

[3] Reitemeier, B.; Notni, G.; Fichtner, D.; Heinze, M.; Schöne, C; Schmidt, A.: Verfahren zur digitalen Darstellung von Körperoberflächen für Epithesen, Strahlenapplikatoren und Atemmasken. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 57 (2002) 10, S. 623-625

[4] Fichtner, D., Schöne, C., Paul, R.: Informationstechnologien im Einsatz für wertvolles Kunstgut. In: Abstracts zur 75. Tagung des Wissenschaftlichen Rates der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen "Zukunftstechnologien für den innovativen Mittelstand". Magdeburg, 28./29. November 2002, S. 3

[5] Schöne, C; Paul, L.: Bildgestützte Digitalisierung von Kulturgütern in Anwendungen der Dokumentation, Restauration und Präsentation, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 2003, Schiele Schön, Berlin, 2003

[6] Schöne, C.; Carlsen, U.; Schreiber, S.: Prototyp für das Scannen von Leitkurven – Motivation, Lösungsweg, Anwendungen. XIV. Gemeinsames Wissenschaftliches Symposium TU Dresden – TU Liberec, Dresden, 23.-25.09.2003, S. 13-17, ISBN 3-86005-371-X

[7] Rudolph,H., Schöne,C., Luthardt,R.: Einfluss der Digitalisierung auf die erreichbare Präzision CAD/CAM-gefertigter zahnmedizinischer Restaurationen, Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 59(2004)2

[8] Quaas, S.; Rudolph, H.; Schöne, C.; Sporbeck, H.; Luthardt, R.: Konstruktion und Fertigung zahnärztlich-prothetischer Restaurationen – Erarbeitung und Validierung einer Prüfkette, 6. Anwendungsbezogener Wokshop zur Erfassung, Verarbeitung, Modellierung und Auswertung von 3D-Daten, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik, Berlin, 2003

[9] Luthardt, R.; Weber, A; Rudolph,H.; Schöne,C; Quaas, S.; Walther, M.: Design and Production of Dental Prothetic Restaurations: Basic research on Dental CAD/CAM technology. International Journal of Computerized Dentistry (2002) 5, Seite 165-176

[10] Rudolph, H., Bornemann, G., Quaas, S., Schöne, C., Weber, A., Benzinger, S., Luthardt, R.G.: Innovatives Modell zur Prüfung der internen und okklusalen Passgenauigkeit CAD/CAM-gefertigter Restaurationen. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 57 (2002) 9, S. 540-544

Hauptzonen im Prozess der Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien

Piotr GENDARZ

Schlesische Technische Universität Gliwice

Keywords

charakteristische Merkmale, Konstruktionsmerkmale, Optimierung, Cluster Analyse

1 Einführung

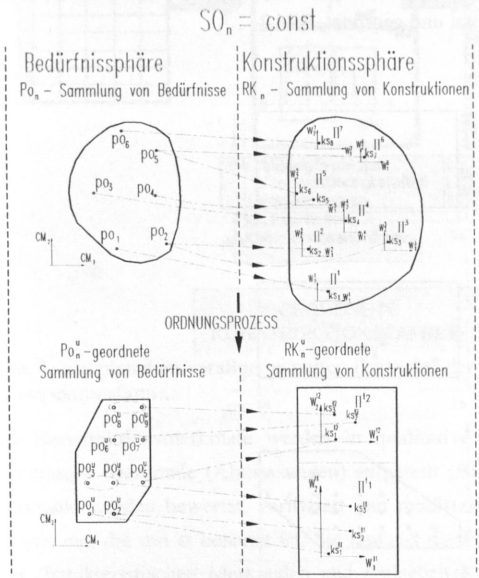


Abb.1: Bedürfnissphäre und Konstruktionssphäre

Neuartige Anforderungen im Konstruktionsprozess und in der Herstellungsvorbereitung betreffen nicht nur die Einführung neuzeitlicher Konstruktionslösungen und Technologien, sondern gehen auch in die Richtung, ein möglichst breites Spektrum von Bedürfnissen für bestimmte Arten von technischen Mitteln zu erfassen. In diesem Vortrag entsprechen den bestimmten Arten von technischen

Mitteln als Abstrakten die Konstruktionsfamilien. Im Bereich der Konstruktionsmenge, verstanden als Konstruktionsfamilie, die einem allgemeinen System SO_n entspricht, werden Umformungen durchgeführt, um von ungeordneter zu geordneter Form zu kommen. Es gibt hier Umformungen in der Bedürf-

nissphäre und in der Konstruktionssphäre, Bild 1.Die Bedürfnissphäre wird durch charakteristische Merkmale beschrieben CM_i. Von diesem Prozess sind hauptsächlich vier Arten ausgezeichnet, in denen sich die größte Umformung in Modulsystemen befindet. Konstruktionsmerkmale werden in qualitative Merkmale (Konstruktionsgestalt) Π^{cj} und quantitative Merkmale (Abmessungen) W_l^{cj} aufgeteilt. Die Ergebnisse der Ordnung von qualitativen Konstruktionsmerkmalen sind typische Konstruktionslösungen, denen typische Konstruktionsgestalten von Elementen und Abmessungsanordnungen entsprechen. Die quantitativen Konstruktionsmerkmale, die in dieser Arbeit hauptsächlich in Erwägung gezogen werden, werden ausgewählt, verifiziert und optimiert.

2 Umformungen in der Bedürfnissphäre

Charakteristische Merkmale sind die Beschaffenheiten, die das zukünftige technische Mittel haben sollen. Für den Hydraulikzylinder sind das: quantitative charakteristische Merkmale, so genannte Parameter (wie Kolbenseitige Kraft, Stangeseitige Kraft, maximale Länge, minimale Länge), Art der rohrseitigen Verbindung, Art der stangeseitigen Verbindung, Art der Speiseschaltung.

Bei der Umformung der Bedürfnissphäre, Unifikation genannt, werden hauptsächlich Werte von charakteristischen Merkmalen begrenzt und geordnet, Bild 2.

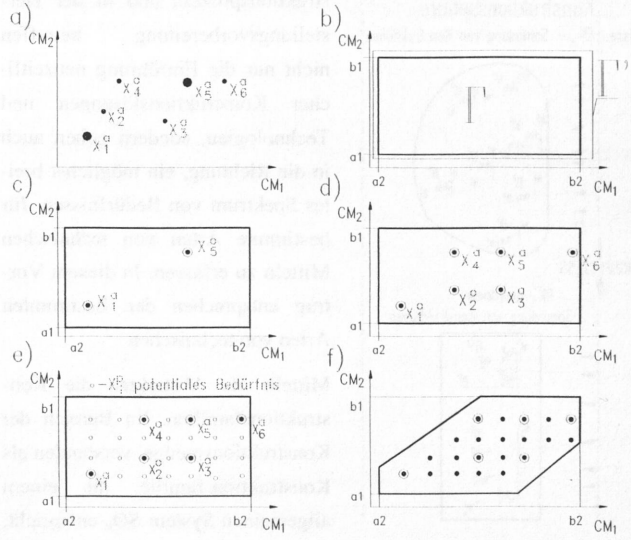


Abb. 2: Umformungen von Werten mit charakteristischen Merkmalen

Den bisherigen Zustand von aktuellen Bedürfnissen zeigt Bild 2a. Um die Werte von charakteristischen Merkmalen zu begrenzen, wird eine Prognosemethode angewendet. Diese basiert

auf der Analyse der Veränderung von Grenzwerten von charakteristischen Merkmalen für bestimmte Zeitabteile. Sie umfasst auch die technische Produktion und ökonomische Grenzmöglichkeiten, Bild 2b. Dann werden diejenigen Werte von charakteristischen Merkmalen ausgewählt, welche den größten Wiederholfaktor haben. Bild 2c. Bild 2d und 2e zeigen die Auswahl und Ordnung nach normalen Zahlen. Letzte Umgestaltung beruht auf der Begrenzung nach Kriterium der Mitwirkung mit anderen technischen Mitteln. So bearbeitete Werte werden unifizierte Werte von charakteristischen Merkmalen genannt.

3 Hauptzuordnungen bei Modulbildungsprozess von Konstruktionen

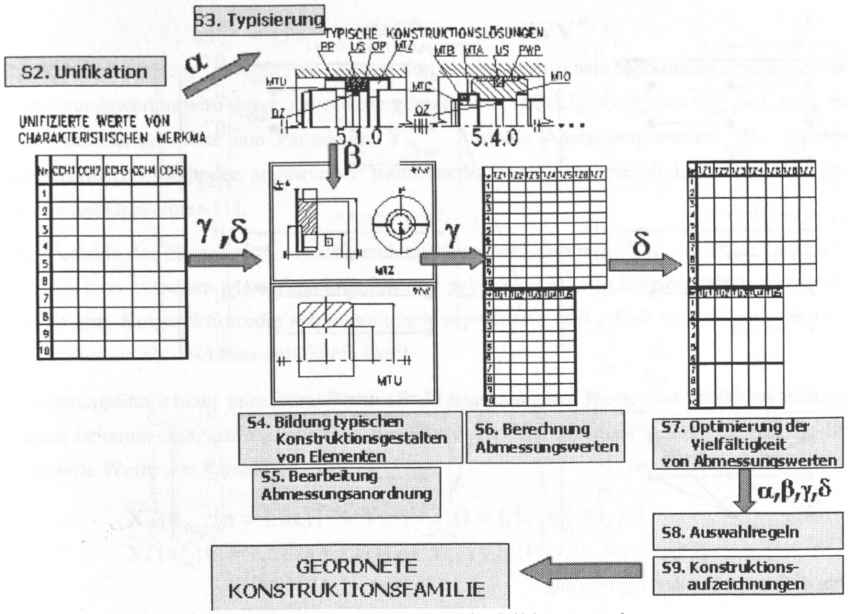


Abb. 3: Hauptstadien verallgemeinerten Prozesses der Bildung geordneter Konstruktionsfamilie

Die Konstruktionsmerkmale werden in qualitative Merkmale (Konstruktionsgestalt) und quantitative Merkmale (Abmessungen) aufgeteilt (Bild 3). Die quantitativen Konstruktionsmerkmale werden bewertet, verifiziert und modifiziert. Im Modulsystem entsteht die erste Zuordnung, die mit α benannt ist. Sie umfasst die Relationen zwischen unifizierten Werten von charakteristischen Merkmalen und typischen Konstruktionslösungen. Bei der Bildung typischer Konstruktionslösungen werden Methoden der Bewertung, Modifikation von Konstruktionslösungen und Bildung maximaler Anzahl von Verbindungen zwischen typischen Konstruktionslösungen angewandet.

Ergebnis der Typisierung können typische Konstruktionslösungen sein, zwischen welchen keine Verbindung stattfindet, Bild 4a. Dadurch werden keine Konstruktionsgestalten erzeugt. Nächste Möglichkeit ist, dass es nur einige solchen Konstruktionslösungen sind, zwischen welchen keine Verbindung gibt. Dann werden die Lösungen gelöscht oder neue Verbindungen zwischen ihnen gebildet, Bild 4b. Das beste Ergebnis liegt vor, wenn eine große Anzahl von Verbindungen zwischen Konstruktionslösungen erzeugt wird, was ermöglicht, mit begrenzter Anzahl von typischen Konstruktionslösungen ein breites Spektrum von Konstruktionsgestalten zu bilden. Auf dem Bild 4c mit 8 typischen Konstruktionslösungen 14 Konstruktionsgestalten.

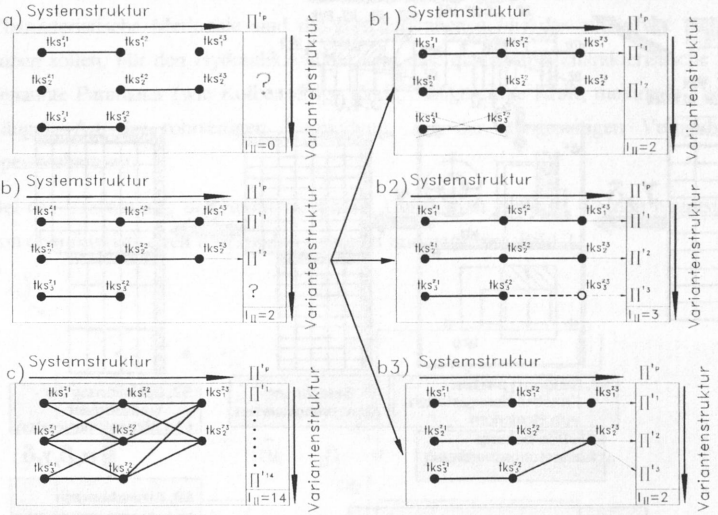


Abb. 4: Ergebnisse der Typisierung

Dekomposition von typischen Konstruktionslösungen werden nach dem Prinzip der Verbindung und Teilung [1] Konstruktionen von Elementen bestimmt. Bei so entstehender Zuordnung β ist auch die Teilung in konstruierende und auswählende (Norm, Katalog) Elemente wichtig.

Die Ergebnisse der Ordnung von qualitativen Konstruktionsmerkmalen sind typische Konstruktionslösungen, denen typische Konstruktionsgestalten von Elementen und Abmessungsanordnungen entsprechen.

Die Abmessungsanordnung umfasst konstante WC^{te_j} und variable Abmessungen WV^{te_j}

$$UW^{te_j} = WC^{te_j} \cup WV^{te_j}, \tag{1}$$

$$WC_l^{te_j} \xrightarrow{cch_{ic}^{u}(i=1,iz)=var} w_{il}^{e_j} = const \tag{2}$$

$$WV_l^{te_j} \xrightarrow{cch_{ic}^{u}(i=1,iz)=var} w_{il}^{e_j} = var \ . \tag{3}$$

Variable Abmessungen sind die, die sich ändern, wenn Werte von Parametern sich ändern. Aus diesem Grund kann man in geordneten Konstruktionsfamilien die kongruenten Konstruktionselemente definieren, als Konstruktionen mit einer konstanten Gestalt, die hauptsächlich durch variable Abmessungen bezeichnet sind

$$ks_m^{te_j} = (\Pi_{rw}^{te_j} \cup WC^{te_j})_{const} \cup (WV^{te_j})_{var} \tag{4}$$

Die Relation zwischen unifizierten Werten von charakteristischen Merkmalen und variablen Abmessungswerten wird durch Zuordnung χ bezeichnet (Bild 3), als $\overline{X}_i^u \rightarrow \overline{Y}_m^{e_j}(j=1,jz)$, wo $\overline{X}_i^u$ - unifizierte Werte von Parameter, $\overline{Y}_m^{e_j}$ - variable Abmessungswerten. Hier werden hauptsächlich 3 Methoden angewendet: traditionelle, Konstruktionsähnlichkeit [1], Algorithmische mit Operatoren [1].

Die Methode der Berechnung mit Anwendung Konstruktionsähnlichkeit basiert auf Ähnlichkeitsgesetzen zwischen Musterkonstruktion und gebildeten Konstruktionen. Musterkonstruktion ist eine Konstruktion, die schon praktisch geprüft war und erfüllt Herstell- und Benutzungskriterien. Es wird Parameterähnlichkeit und $\varphi_{ia}^u = \frac{x_{ia}^u}{x_{0a}}$ $\varphi_{il}^{e_j} = \frac{y_{il}^{e_j}}{y_{0l}^{e_j}}$ Abmessungsähnlichkeit angeführt. Wenn für Musterparameter Werte von variablen Abmessungen bekannt sind, dann erhält man die Werte der Abmessungen werden Elementen für unifizierte Werte von Parameter.

$$\begin{aligned} &\overline{X}_0\{x_{0a};(a=1,az)\} \rightarrow \overline{Y}_0^{te_j}\{y_{0l}^{e_j};(l=1,lv_j)(j=1,jz)\} \\ &\overline{X}_i\{x_{ia}^u;(a=1,az)(i=1,iz)\} \rightarrow \overline{Y}_i^{te_j}\{y_{il}^{e_j};(l=1,lv_j)(j=1,jz)\} \end{aligned} \tag{5}$$

Die Ähnlichkeitsgesetze für Konstruktionsfamilie werden nach identischen physikalischen, Festigkeits- und Verbindungszuständen gebildet. Auf Grund von Ähnlichkeitsgesetzen für unifizierte Werte von Parametern werden Abmessungswerte nach Kopplungsgraph berechnet, Bild 5.

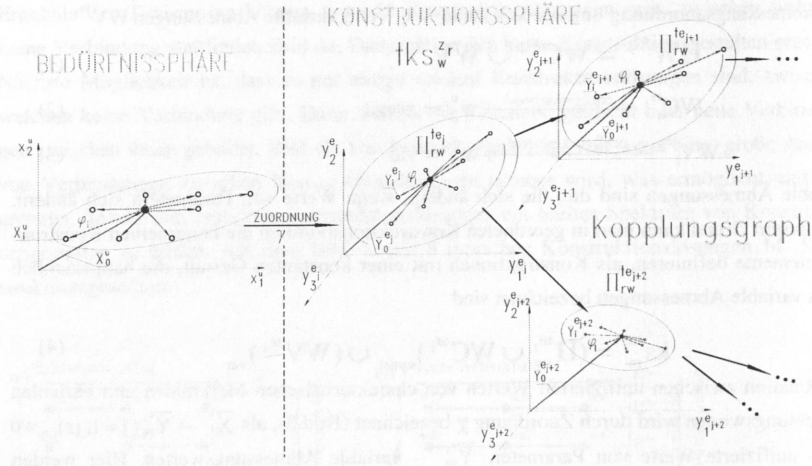


Abb. 5: Konstruktionsähnlichkeit

Die algorithmische Methode mit Operatoren basiert auf der Berechnung für unifizierte Werte von Parametern, Abmessungswerte nach objektgerechter Art und Reihenfolge des Kopplungsgraphs (Bild 6),

$$y^{e_j}_{ml}\,(j=1, jz) = [O] \cdot x^{u}_{ia} \qquad (6)$$

.

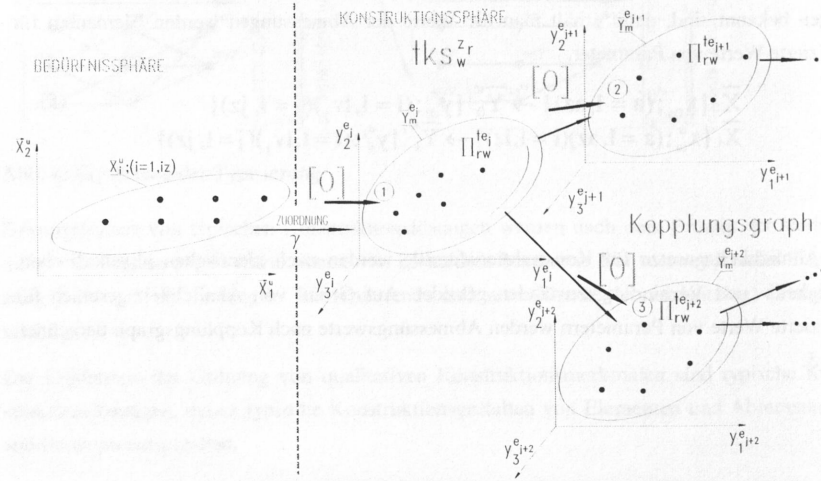


Abb. 6: Abmessungswerteberechnung mit Operatoren

Zu den Hauptoperatoren gehören: geometrische Operatoren, Festigkeitsoperatoren, Operatoren Katalogelemente, Herstellungsoperatoren, Ähnlichkeitsoperatoren, Operatoren gekoppelter Abmessungen [2]. Die Berechnung und Verifizierung der Abmessungswerte neigt besonders zu Algorithmisierung, ist aber nur auf eine bestimmte Konstruktionsfamilie orientiert.

Die Optimierung der Vielfältigkeit von Abmessungswerten ist jedoch eine universelle Frage, die verschiedene Konstruktionsfamilien betrifft, sie hat vor allem Einfluss auf die Anzahl von Konstruktionsmodulen in den geordneten Konstruktionsfamilien. In Hinsicht auf das Umwandlungsergebnis von Abmessungswerten können einer bestimmten typischen Konstruktionsgestalt des Elementes e_i zwei extreme Zustände zugeordnet werden, (Bild 7):

S1. dem ganzen Wertebereich charakteristischer Merkmale entspricht ein Konstruktionsmodul,

S2. jedem Vektor charakteristischer Merkmale entspricht ein Konstruktionsmodul.

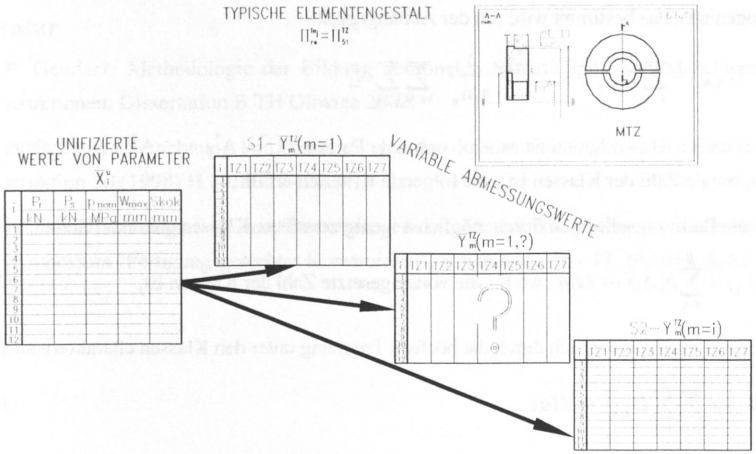


Abb. 7: Illustration des Optimierungsproblems

Der S1-Zustand ist vor allem wegen der Serienherstellung, der Austauschbarkeit des Elementes vorteilhaft, dagegen ist der S2-Zustand wegen der Minimalisierung der Überdimensionierung der Konstruktion, also der Minimalisierung der Masse, maximaler Anstrengung des Materials, günstig. Um das Problem der Optimierung der Vielfältigkeit von Abmessungswerten zu lösen, wurde eine neue Art von automatischer Klassifikation angewendet [3].

Die Optimierung wird auf zwei Stufen durchgeführt:

1) Bildung der optimalen Partition - Klassifikation,

2) Wahl der Klassenvertreter.

Die hier angewandte Hauptmetrik ist die euklidische Metrik d_{jk}^2, als Maß der Differenziertheit unter den Konstruktionen k_j^{el} (k_j) a k_k^{el} (k_k) angenommen:

$$d_{jk}^2 = \sum_{u=1}^{u_z} (y_{ju} - y_{ku})^2 \tag{7}$$

Grundlage für die Bewertung der Partition U={A_1,....A_z) ist das Maß der Klassentrennung h(Al) (Homogenität), die bestimmt nach der Abhängigkeit:

$$h(A_l) = \frac{1}{2n_{A_l}} \sum_{k \in A_l} \sum_{j \in A_l} d_{kj}^2 . \tag{8}$$

ersetzt wird.

Das zweite Bewertungsmaß der Klassen ist das Trennungsmaß unter den Klassen A_l und A_n, (Heterogenität), das bestimmt wird mit der Abhängigkeit:

$$D_{A_l A_n} = \sum_{u=1}^{u_z} (\bar{y}_{uA_l} - \bar{y}_{uA_n})^2 = \frac{1}{n_l n_n} \sum_{k \in A_l} \sum_{j \in A_n} d_{kj}^2 . \tag{9}$$

Das Ziel dieser Klassifikation ist es, eine optimale Partition U^*={A^*_1,.....A^*_α) zu erhalten, (wo α die optimale Zahl der Klassen ist), die folgende Kriterien erfüllt:

K1: die Partition sollte sich durch möglichst wenig zerstreute Klassen charakterisieren,

$$H(U_\beta) = \sum_{l=1}^{\beta} h(A_l) \rightarrow Min \text{, wo } \beta \text{ - die vorausgesetzte Zahl der Klassen ist,} \tag{10}$$

K2: die Partition sollte sich durch die höchste Trennung unter den Klassen charakterisieren,

$$D(U_\beta) = \sum_{l=1}^{\beta-1} \sum_{n>l}^{\beta} D_{A_l A_n} \rightarrow Max. \tag{11}$$

Unter den verschiedenen Klassifikationsmethoden wurde in dieser Arbeit zuerst die hierarchische und dann iterative Klassifikation angewendet. In der hierarchischen Klassifikation werden die angefangenen Partitionen gebildet. Die iterative Klassifikation beruht auf einer iterativen Vervollkommnung der Partitionen für die vorausgesetzte Zahl von β Klassen, das heißt:

$$H(U_\beta^0) > H(U_\beta^1) > H(U_\beta^2) > .....H(U_\beta^z) = H(U_\beta^*) . \tag{12}$$

Um die optimale Zahl der Klassen und dann global die optimale Partition U_β^{**} zu bestimmen, wurde die Zielfunktion:

$$G(U_\beta^*) = \frac{1}{\binom{\beta}{2}} D(U_\beta^*) - \frac{1}{\beta} H(U_\beta^*) \tag{13}$$

entwickelt.

Die Grundlage für die Bestimmung des globalen Optimums ist der maximale Wert der Zielfunktion:

$$G(U_\alpha^{**}) = Max(G(U_\beta^*)) \text{ ; für } \beta=(N1,N2). \tag{14}$$

Die Grundlage für die Wahl der Klassenvertreter sind die maximalen Werte charakteristischer Merkmale, die den Klassen entsprechen. Ergebnis der Optimierung ist die Zuordnung δ, (Bild 3). Die Auswahlregeln in Modulsystem werden auf Grund von Zuordnungen: α, β, χ und δ gebaut und die Konstruktionsmodule mit Parametrisierung aufgezeichnet, (Bild 3).

Literatur

[1] P. Gendarz: Methodologie der Bildung geordneten Sammlungen von Maschinenkonstruktionen. Dissertation B TH Gliwice 2002.

[2] P. Gendarz: Berechnung von Abmessungen für die Entwicklung von Baureihen. Konstruktion 50 (1998) H.10, S. 23 - 28.

[3] P. Gendarz: Integration von Berechnungen im Modulbildungsprozess. Materialien 8 Symposium "Fertigungsgerechtes Konstruieren", Schneittach, 16 - 17. 10.1997. S. 82 -90.

Anforderungen an den Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik

Hansgeorg BINZ, Robert WATTY

Universität Stuttgart

Abstract

Erfolgreiche Entwicklung von Mikrosystemen erfordert einen maßgeschneiderten und optimierten Entwicklungsprozess, der die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik berücksichtigt. Durch eine stark technologiegetriebene Produktentwicklung, fehlende Standardisierung von Komponenten, Integration verschiedener Technikdomänen auf engstem Raum und eine große Palette angewendeter Fertigungsverfahren unterscheidet sich die Mikrosystemtechnik deutlich von anderen Disziplinen. Eine einfache Übertragung bewährter Entwicklungsmethodiken ist daher ohne entsprechende Modifikationen nicht möglich. Nachfolgend werden die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik dargestellt und daraus Anforderungen an den Entwicklungsprozess abgeleitet.

Keywords

Mikrosystemtechnik, Entwicklungsprozess, Entwicklungsmethodik

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik ist eine relativ junge Disziplin, deren Bedeutung im letzten Jahrzehnt mit jährlichen Zuwachsraten bis zu 20% stark zugenommen hat. Auch aufgrund eines enormen Potenzials in zahlreichen neuen Einsatzgebieten wird die Mikrosystemtechnik als eine Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert bezeichnet. In diesem schnell wachsenden, innovativen und sehr dynamischen Marktsegment erfordert die Platzierung neuer Produkte hohe Investitionen sowie eine systematische Organisation sowohl des Entwicklungsprozesses als auch der Produktionskette, um den Gesamtablauf vom Beginn der Entwicklung bis hin zur Markteinführung neuer Produkte zu beschleunigen. Aufgrund der Neuheit von Produkten und Herstellungstechnologien kann nicht auf breite Erfahrungen vergangener Entwicklungen zurückgegriffen werden. Die Entwicklungsabläufe sind weder standardisiert noch ausreichend strukturiert und erprobt. Einige Ansätze zu einer systematischen Vorgehensweise sind bekannt, haben sich aber nicht durchgesetzt [1], [2]. Auch ein Wissensaustausch zur Vorgehensweise bei der Entwicklung findet nur in sehr geringem Maße statt.

Die Entwicklung wird oft basierend auf einer „genialen Idee" begonnen, eine systematische Lösungssuche wird meist zugunsten einer kurzen Entwicklungszeit vernachlässigt. Das Produkt wird dann solange angepasst, bis die geforderten Eigenschaften erreicht sind.

Um die Potenziale der Mikrosystemtechnik voll auszuschöpfen, Wissen zu ordnen und für weitere Entwicklungen nutzbar zu machen und in möglichst kurzer Zeit marktreife und fehlerfreie Produkte zu entwickeln, ist es sinnvoll, den Entwicklungsablauf zu strukturieren und zu planen, wie es sich in anderen Bereichen, z. B. dem Maschinenbau, der Elektrotechnik oder der Informatik, bewährt hat. Dazu ist es unerlässlich, zunächst die Unterschiede zum Entwicklungsablauf in den genannten Bereichen zu untersuchen und die speziellen Anforderungen und Besonderheiten der Mikrosystemtechnik festzustellen, um dann darauf aufbauend Anforderungen abzuleiten, die an einen Entwicklungsprozess für mikrosystemtechnische Produkte gestellt werden müssen.

2 Mikrosystemtechnik

Der Begriff Mikrosystem fand bereits in der Mikroelektronik für die Kombination mehrerer integrierter Schaltungen zu einem komplexen System Verwendung. Die Mikroelektronik befasst sich mit rein elektronischen Bauteilen, deren zweidimensionale Struktur in der Regel voll automatisiert entworfen wird. Die neuere Definition eines Mikrosystems schließt nun außer der Mikroelektronik auch Komponenten aus anderen Bereichen mit ein, die in der Regel drei-dimensional strukturiert sind [3], [4].

Mikrosysteme setzen sich aus Komponenten wie Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform zusammen, die so zu einem Gesamtsystem verknüpft sind, dass sie "empfinden", "entscheiden" und "reagieren" können [5]. Hierbei ist entscheidend, dass die Funktionen eigenständig erfolgen. Sensoren entsprechen den menschlichen Sinnesorganen und wandeln nichtelektrische Größen in elektrische Größen um, die Signalverarbeitung entspricht dem Gehirn, und Aktoren wandeln elektrische in nichtelektrische Signale und entsprechen den menschlichen Gliedmaßen. Die Komponenten bestehen wiederum aus Funktions- bzw. Formelementen wie z. B. Biegebalken, Membranen oder Lagern.

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems. Auf ein Substrat aus Silizium mit integrierten Strukturen sind z. B. elektronische Komponenten montiert, kontaktiert und mit einem Gehäuse umgeben. In der internationalen Literatur werden Mikrosysteme als integrierte mikromechanische und mikroelektronische Komponenten mit dem Ausdruck „Micro Electro Mechanical Systems", oder kurz MEMS beschrieben [1].

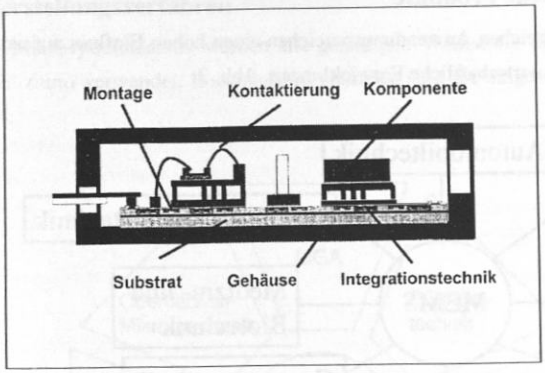


Abb. 1: Aufbau eines Mikrosystems [6]

Die Mikrosystemtechnik befasst sich mit dem Entwurf, der Herstellung und der Applikation solcher Systeme [1], [4]. Die kleinsten Abmessungen eines mit dieser Technik hergestellten Objektes liegen in mindestens einer Dimension im Mikrometerbereich. Einerseits erlaubt die Verkleinerung die Unterbringung vieler Elemente auf kleinstem Raum (Integration), andererseits erzeugt sie vollkommen neue technische Möglichkeiten und Eigenschaften der miniaturisierten Produkte (z. B. Frequenzverhalten, Trägheit, Energieverbrauch). In der Mikrosystemtechnik sind Komponenten aus den verschiedensten Disziplinen der Physik, wie z. B. Mikromechanik, Mikroelektronik, Mikroakustik, Mikrooptik und Mikrofluidik, aber auch aus der Mikrobiologie und Mikrochemie auf engstem Raum integriert, Abb. 2. Nur durch die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und ihr korrektes Zusammenwirken wird die Gesamtfunktion des Systems erfüllt.

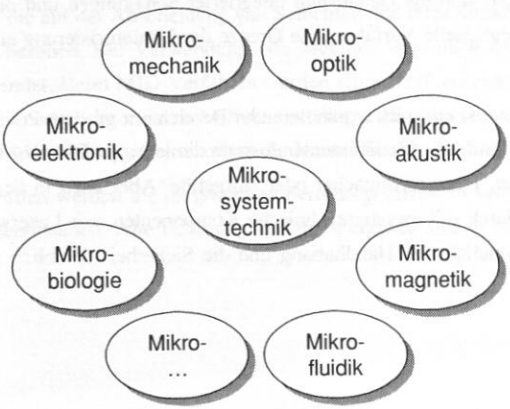


Abb. 2: Disziplinen in der Mikrosystemtechnik [3], [4]

3 Mikrosystemtechnische Produkte

Mikrosysteme haben in zahlreichen Anwendungsbereichen einen hohen Einfluss auf aktuelle und künftige technische und wirtschaftliche Entwicklungen, Abb. 3.

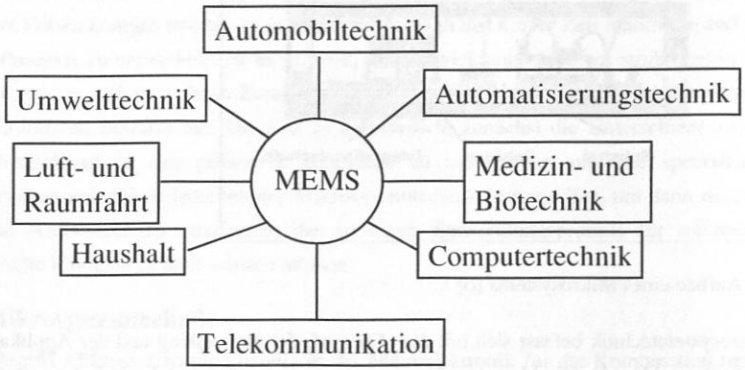


Abb. 3: Einsatzgebiete der Mikrosystemtechnik, nach [7]

Durch Mikrosysteme kann ein Mehrwert für konventionelle Systeme erreicht werden, oder diese werden ersetzt, um insbesondere Kostenvorteile zu erzielen.

So sind beispielsweise in Kraftfahrzeugen eine Reihe von Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. ABS oder Airbag, mit mikrosystemtechnischen Sensoren realisiert.

Den größten Umsatzanteil haben Druckköpfe und Schreib- / Leseköpfe für Festplatten im Bereich der Computertechnik. Hier leisten mikrosystemtechnische Komponenten einen wichtigen Beitrag zu Miniaturisierung, Integration und kostengünstiger Massenfertigung. Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall sind die Gehäusung integrierter Schaltungen und die Verbindungstechnik, bei der konventionelle Verfahren die Grenze der Miniaturisierung erreicht haben.

Aber auch die Medizintechnik ist ein stark expandierender Bereich mit großem Potenzial. Typische Anwendungsgebiete sind hier Medikamentendosiersysteme im µl-Bereich, Diagnosesysteme z. B. für Blutzucker, Herzschrittmacher oder Hörgeräte. Aber auch in der minimal invasiven Chirurgie kann durch mikrosystemtechnische Komponenten wie Laserwerkzeuge oder Endoskope die Funktionalität, die Handhabung und die Sicherheit erheblich gesteigert werden [7].

4 Herstellungsverfahren

In der Mikrosystemtechnik werden alle geläufigen Werkstoffe (Stähle, Kunststoff, Keramiken, Silizium) verwendet. Entsprechend vielfältig sind die eingesetzten Fertigungsverfahren, Abb. 4.

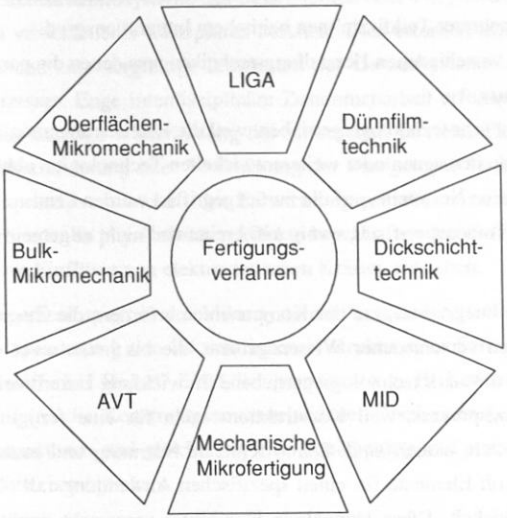


Abb. 4: Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik (Auswahl) [4], [6]

Die Bearbeitung von Silizium erfolgt meist mit den in der Mikroelektronik bewährten Verfahren (LIGA, Bulk-Mikromechanik, Dünnfilmtechnik, Dickschichttechnik, Oberflächenmikromechanik), die auf der Abscheidung von Schichten und ihrer Strukturierung durch Lithografie und Ätzen beruhen. Bei Verwendung von Metallen wird auch die mechanische Mikrofertigung verwendet. Beim MID-Verfahren werden Kunststoffspritzlinge mit metallisierten Oberflächen verwendet, die eine recht freie und kostengünstige Formgebung ermöglichen. Die Aufbau- und Verbindungstechnik dient der Kontaktierung der einzelnen Bauteile, s. Abb. 1.

In vielen Fällen werden die dargestellten Fertigungsverfahren auch kombiniert, um ein Mikrosystem herzustellen. Alle Fertigungsverfahren eigenen sich in erster Linie für hohe Stückzahlen.

5 Anforderungen an den Entwicklungsprozess der Mikrosystemtechnik

Der Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik ist durch eine Reihe von Besonderheiten charakterisiert, die sich zum Teil aus den zuvor dargestellten grundsätzlichen Unterschieden zu anderen Bereichen der Technik ergeben:

- Anforderungen hängen zum Teil stark vom jeweiligen Anwendungsgebiet ab.
- Zusammenarbeit mehrerer Teildisziplinen bei hohem Integrationsgrad.
- Große Anzahl von verschiedenen Herstellungstechniken, aus denen die passende ausgewählt werden muss.
- Die Entwicklung ist sehr technologiegetrieben, weil die Realisierungsmöglichkeit oft von parallel entwickelten neuen oder weiterentwickelten Technologien abhängt.
- Es gibt praktisch keine Normteile, auf die zurückgegriffen werden kann.
- Wissen ist oft sehr firmenspezifisch, wenig aufbereitet und nicht allgemein zugänglich.

Die Vielfalt und der hohe Integrationsgrad der Komponenten erfordern die Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten verschiedener Wissensgebiete, die bis heute nicht optimal ist. Darüber hinaus verursacht die stark technologiegetriebene Entwicklung Unterbrechungen und Iterationen im Entwicklungsprozess, weil Konstruktionsregeln für eine fertigungsgerechte Entwicklung fehlen oder nicht aktuell sind. Durch fehlende Normung und unzureichenden Wissensaustausch werden oft Elemente für einen spezifischen Anwendungsfall ohne weitere Einsatzmöglichkeiten entwickelt. Diese mangelnde Flexibilität verursacht unnötige Kosten durch Mehrfachentwicklungen. Gerade optimale Abstimmung bei der Zusammenarbeit und effektives Wissensmanagement sind aber künftige Schlüsselkompetenzen des Wirtschaftzweiges Mikrosystemtechnik [8]. Erfahrungen in anderen Bereichen der Technik zeigen, dass ein sorgfältig geplanter Ablauf Effektivität und Effizienz des Entwicklungsprozesses erheblich verbessern kann. Im Maschinenbau [9], [10], [11], in der Mechatronik [12] und in der Softwaretechnik [13] hat sich eine methodische Vorgehensweise bewährt. Aus den dargestellten Eigenschaften der Mikrosystemtechnik können folgende Anforderungen an eine Methodik für die Mikrosystemtechnik abgeleitet werden:

- Systembetrachtung von Mikrosystemen,
- klarer Schnittstellendefinition und Informationsaustausch zwischen interdisziplinären Teilbereichen,
- Unterstützung bei Anpassungskonstruktionen,
- Wissensmanagement zur Speicherung von Informationen,
- Beachtung von wechselseitiger Beeinflussung von Produkt- und Fertigungstechnologieentwicklung,
- auf die Einsatzbereiche abgestimmt (keine einheitliche Vorgehensweise),
- ganzheitliche Sicht auf den Produktlebenszyklus.

Mikrosysteme sind technische Systeme, die aus Systemsicht nach Hubka [14] durch den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen charakterisiert werden können. Die Gesamtfunktion kann in Teilfunktionen mit verknüpften Unterfunktionen zerlegt werden. Eine besondere Bedeutung kommt unerwünschten Störgrößen aufgrund der hohen Integration und den Auswirkungen von Elementen mit mehreren integrierten Funktionen zu. In den meisten Fällen bestehen Mikrosysteme aus Subsystemen oder integrierten Komponenten, die auf Technologien verschiedener Disziplinen beruhen. Dies erfordert eine präzise Definition der Schnittstellen und eine sorgfältige Integration des Gesamtsystems in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Enge Interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordert viel mehr als in anderen Disziplinen ständige Weiterbildung der Mitarbeiter. In vielen Fällen werden Mikrosysteme durch Miniaturisierung oder Veränderung der Fertigungstechnologie unter Beibehaltung des Funktionsprinzips entwickelt. Im Entwicklungsprozess müssen diese Besonderheit und die damit verbundenen physikalischen Effekte beachtet werden. So können z. B. bei Verkleinerung negative Einflüsse von elektrostatischen Kräften entstehen.

Wissensmanagement spielt in der Mikrosystemtechnik eine zentrale Rolle. Ein wesentlicher Punkt ist die Speicherung von Informationen in strukturierter Form mit der Möglichkeit des schnellen Zugriffs bei Bedarf. Ein Lösungsansatz ist z. B. Konstruktionsregeln oder Konstruktionskataloge, die Konstrukteure verschiedener Disziplinen bei der Findung passender Lösungen unterstützen und gleichzeitig eine Speicherung und erneuten Zugriff bei nachfolgenden Projekten ermöglichen.

Technologische Aspekte spielen im gesamten Entwicklungsprozess eine große Rolle. Durch die oftmals parallel zur Produktentwicklung stattfindende Optimierung der Herstellungstechnologie ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Produktentwickler und Technologieentwickler die Voraussetzung für eine optimale Ausnutzung der Möglichkeiten von Mikrosystemen und ihren Herstellungstechnologien.

Eine einheitliche Vorgehensweise erscheint angesichts der Vielfalt der Mikrosystemtechnik, der unterschiedlichen Entwicklungsprozesse und auch der unterschiedlichen Struktur und Größe der beteiligten Unternehmen nur schwer möglich. Eine Methodik für die Mikrosystemtechnik kann einen Rahmen für die Vorgehensweise bieten, der dann an die Anforderungen der Unternehmen, des Produkts und sonstiger Rahmenbedingungen angepasst werden muss.

Eine ganzheitliche Sicht auf den gesamten Produktlebenszyklus hilft insbesondere, die Funktion des Produktes in allen Phasen seines Lebenszyklus zu gewährleisten und Anforderungen aus verschiedenen Sichten zu sammeln. Aber auch eine ganzheitliche Betrachtung von Kosten und Umweltaspekten unterstützt Kosteneinsparungen und verbessert die Qualität des Produktes.

Literatur

[1] Kasper, M.: Mikrosystementwurf, Springer Verlag, Berlin, 2000

[2] Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik, Dresden university press, 2000

[3] Lang, M.: Entwurfsmethoden und Rapid Prototyping integrierter Mikrosysteme, Shaker Verlag, Aachen, 1998

[4] Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik, Hanser Verlag, München, Wien, 1997

[5] Mikrosystemtechnik 1994 - 1999. Programm des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik. Jahresbericht 1994, 1995

[6] Reichl, H.: Skript zur Vorlesung "Entwurf und Simulation von Mikrosystemen I", TU Berlin, 2004

[7] The NEXUS product-technology roadmap for microsystems, The NEXUS Association, Grenoble, 2003

[8] o. V.: Mikro- und Nanowelten in der Schweiz, Schweizer Maschinen Markt 31-32/2003

[9] Pahl, W., Beitz, G.: Engineering design: a systematic approach, Springer 1995

[10] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993

[11] Roozenburg, N. , Eekels, J.: Product design: fundamentals and methods, Wiley, Chichester, 1995

[12] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Beuth Verlag, Berlin, 2004

[13] Balzert, H.: Grundlagen der Informatik Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg, 1999

[14] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme, Springer Verlag, Berlin, 1984

Probleme der verteilten Konstruktion maschinenbaulicher Erzeugnisse - Ein Erfahrungsbericht aus der studentischen Ausbildung

Reinhard RAHN, Jana HADLER, Klaus BRÖKEL

Universität Rostock

Keywords

Verteiltes Konstruieren, Verbundprojekt, Lernplattform, Konstruktionskonferenz, Collaboration-Tool

1 Vorstellung des Projektes ProTeachNet

ProTeachNet (http://www.pro-teach-net.de) entstand aus einem BMBF-gefördertem Verbundprojekt, welches von März 2001 bis Dezember 2003 an fünf und später sechs deutschen Hochschulen und Universitäten bearbeitet wurde. Im Ergebnis existiert ein universitätsübergreifendes Ausbildungsnetzwerk für das Fach Konstruktionstechnik.

Die Konstruktionstechnik/ Produktentwicklung stellt in allen Maschinenbaustudiengängen mit ihren unterschiedlichen fachlichen Ausrichtungen und auch in benachbarten ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen, z.B. im Wirtschaftsingenieurwesen oder in der Elektrotechnik, einen wesentlichen Bestandteil des Grundstudiums und auch des Hauptstudiums dar. Die Konstruktionstechnik ist ein Querschnittsfach, welches Grundlagenwissen auf den Gebieten der Mathematik, Physik, Chemie, Mechanik, Werkstoffkunde, Thermodynamik, Strömungslehre und der Fertigungstechnik sowie ein fundiertes methodisches Grundverständnis erfordert.

ProTeachNet unterstützt die Vermittlung und Festigung von Grundlagenwissen im maschinenbaulichen Bereich. Dazu gehören u.a. Technisches Zeichnen, Gestaltungslehre, Maschinenelemente und Grundlagen der Festigkeit sowie auch der Konstruktionsmethodik und die Nutzung von Werkzeugen zum Computer Aided Design (CAD), Product Data Management (PDM), Rapid Prototyping (RP) und Digital MockUp (DMU).

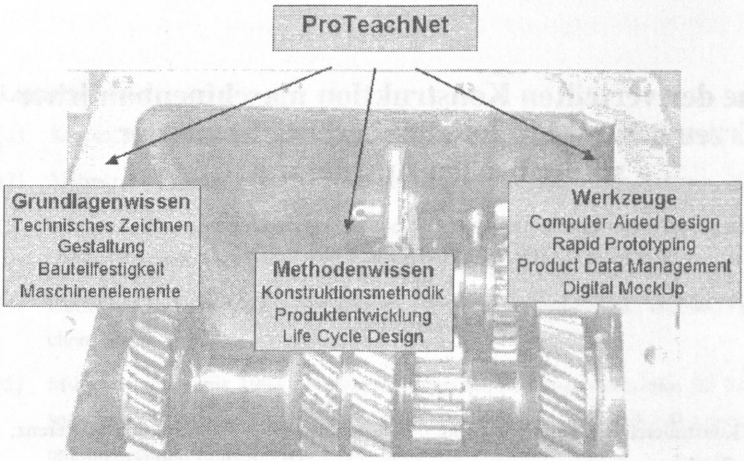


Abb. 1: Übersicht zu ProTeachNet

Traditionelle Lehr- und Lernweisen in Form von Vorlesungen und Übungen wurden um multimediale und netzbasierte Aspekte ergänzt bzw. erweitert. Partner bei der Projektrealisierung waren Institute der Universitäten Magdeburg, Bremen, Karlsruhe, Rostock, der Technischen Universität Ilmenau sowie der Fachhochschule Gelsenkirchen.

2 Ziele

2.1 Zieldefinition

ProTeachNet ist eine Wissens- und Methoden-Basis von multimedialen Lehr- und Lernmodulen zur Unterstützung des Studiums zum Maschinenbauingenieur im Wissensgebiet Produktentwicklung, die sowohl theoretisches als auch Erfahrungswissen für Lerner und Lehrende in der universitären Aus- und Weiterbildung im Sinne eines „Life-Long-Learnings" und eines „Learning on Demand" online verfügbar macht.

Der überwiegende Teil der entwickelten Basis wird von Grundlagenthemen beherrscht, wodurch eine Beständigkeit und gleichzeitige permanente Aktualität des Lehrstoffes im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung gegeben ist. Es handelt sich um ein systematisch strukturiertes Lehrangebot (vertikale und horizontale Ebenen), welches eine flexible, modulare Vermittlung und Festigung der Inhalte zulässt. Die vertikale Struktur mit teilweise aufeinander aufbauenden, aber trotzdem separat zu verwendenden Komponenten bietet schrittweise einen vertiefenden Einstieg in verschiedene Themen.

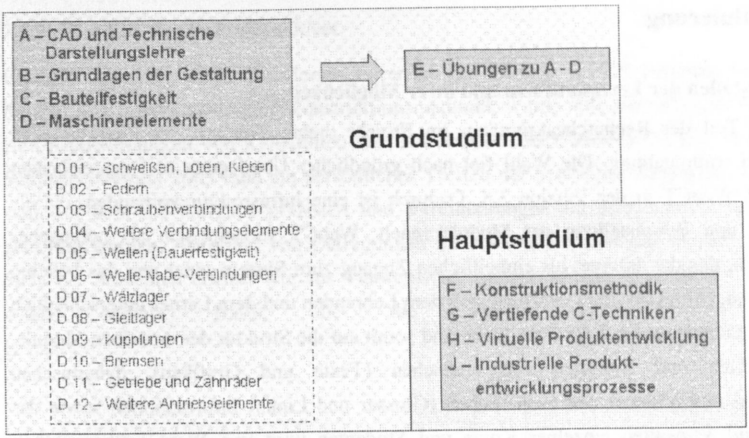


Abb. 2: Modularer Aufbau von ProTeachNet

2.2 Erreichen der Zielvorgaben

Gemäß der Projektaufgabe waren Materialien zu erarbeiten, welche innerhalb der Lehrveranstaltungen und für das Selbststudium nutzbar sind, wobei die neuen Möglichkeiten des Mediums Internet und entsprechende Präsentationssoftware genutzt werden sollten.

Nachdem der Umfang und die Gliederung des Gesamtinhalts sowie die Arbeitsteilung mit den Partnern des Projekts abgestimmt waren, wurden die Wissenselemente ausgewählt, bei denen die Anwendung der neuen Medien notwendig bzw. sinnvoll erschienen. Diese Auswahl war erforderlich, weil die traditionelle Darstellungsweise für einen erheblichen Anteil der Wissensvermittlung optimal ist und so eine Konzentration auf Schwerpunkte möglich war. Dabei wurde natürlich auch mit verschiedenen Beispielen und Darstellungsweisen experimentiert, um methodische Erfahrungen zu sammeln.

Die Veranschaulichung der bearbeiteten Module erfolgte dann als eine Mischung aus traditioneller und multimedialer Darstellung der ausgewählten Schwerpunkte, so dass Lehrmaterial entstand, welches den Lehrstoff zusammenhängend darbietet und auch als Selbststudienmaterial relativ eigenständig nutzbar ist.

Die neuen Varianten der elektronischen Wissenspräsentation erweitern die konventionellen Darstellungen insbesondere durch die Möglichkeit dreidimensionaler Darstellungen mit beliebig auswählbaren Ansichten und Schnitten, die Abbildung zeitlicher Prozessabläufe und die Interaktion des Nutzers zur Modifikation der darzustellenden Objekte.

Die multimediale Darbietung der ausgewählten Wissenselemente wurde mit hohem zeitlichen und damit personellem Aufwand erarbeitet.

3 Evaluierung

3.1 Vorstellen der Lernplattform und ihrer Möglichkeiten

Ein großer Teil der Rechercheaktivitäten im Projekt drehte sich um die Auswahl einer geeigneten Lernumgebung. Die Wahl fiel nach gründlicher Überlegung und ausreichender Testung auf WebCT in der Version 3.8. Dadurch ist eine Infrastruktur vorhanden, die die Verwaltung und Bereitstellung der Module regelt. WebCT versteht sich als homogenes Modulsystem, das das Internet als einheitlichen Zugang zum System nutzt und das beliebig erweiterbar ist. Mittels WebCT eröffnen sich dem Lehrenden und dem Lerner unterschiedlich aufbereitete Sichtweisen auf die Oberfläche und somit auf die Struktur der einzelnen Module. Das Erarbeiten und Einfügen von statischen (Texte und Grafiken), dynamischen (Animationen und Videos) und zusätzlichen (Glossar und Links) Informationen sowie das Festlegen und Verwalten einzelner Kurse und Studenten wird von WebCT übersichtlich gelöst. Auf der anderen Seite sind die Inhaltsmodule so gestaltet, dass die Möglichkeit gegeben ist, diese ohne größeres Bearbeiten in andere Lernmanagementsysteme zu implementieren, da alle Daten in HTML bzw. gängigen Internetformaten erstellt sind. Die Erfahrung einer ersten Evaluierung ergab sich aufgrund der Durchführung zweier Konstruktionspraktika, welche im Folgenden beschrieben werden.

3.2 Konstruktionspraktikum zum verteilten Konstruieren

Im Speziellen beschäftigt sich ein Modul von ProTeachNet mit der virtuellen Produktentwicklung. Mittels Prinzipien und Methoden zur Produktentwicklung wird ein kompletter Zyklus von der Anforderungsermittlung bis zur virtuellen Montage von Baugruppen unter Nutzung sämtlicher in ProTeachNet integrierter Möglichkeiten sowie eines kommerziellen CAD-Systems durchgespielt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt in der „verteilten Konstruktion". An unterschiedlichen, deutschlandweiten Standorten wurden hierfür Projektgruppen auf studentischer Seite gebildet, die jeweils Komponenten einer komplexen Konstruktion (Praxisbeispiel) generieren und über das Internet mit den unterschiedlichen Methoden kommunizieren sollten. Zur Bearbeitung der Aufgaben waren die Möglichkeiten von ProTeachNet und eine externe Videokonferenzsoftware zugelassen. Da die Ausbildung der Studenten universitätsabhängig in unterschiedlichen CAD-Systemen erfolgt, ist eine weitere Software (OneSpace Collaboration) notwendig, welche nicht nur das gleichzeitige Betrachten der Modelle ermöglicht, sondern auch Bearbeitungsfunktionen und Werkzeuge zur Verfügung stellt. Dazu werden die einzelnen Bauteile, die an verschiedenen Standorten und durch unterschiedliche CAD-Systeme erzeugt wurden, im IGES-Format in das Collaboration-Tool geladen.

3.2.1 Der Einstieg in ProTeachNet

Etwa 20 Studenten aus 5 Standorten waren an der Lösung EINER Aufgabe beteiligt. Im Rahmen der Lehrveranstaltung Konstruktionsmethodik wurde eine automatische Einrichtung zum Konfektionieren von Kabeltüllen aus Schrumpfschlauch entwickelt. Mit dem Start des Sommersemesters 2003 fand ein persönliches Treffen der beteiligten Studenten und Tutoren statt, auf dem die Aufgabe präzisiert und Vereinbarungen zur künftigen Zusammenarbeit getroffen wurden. Aufgrund von Befragungen im Nachhinein wird ein solches Treffen aus Sicht der Studenten ebenso wie aus Tutorensicht als sehr wichtig erachtet. Es schafft eine solide soziale Basis, die die weitere Zusammenarbeit effektiv gestaltet.

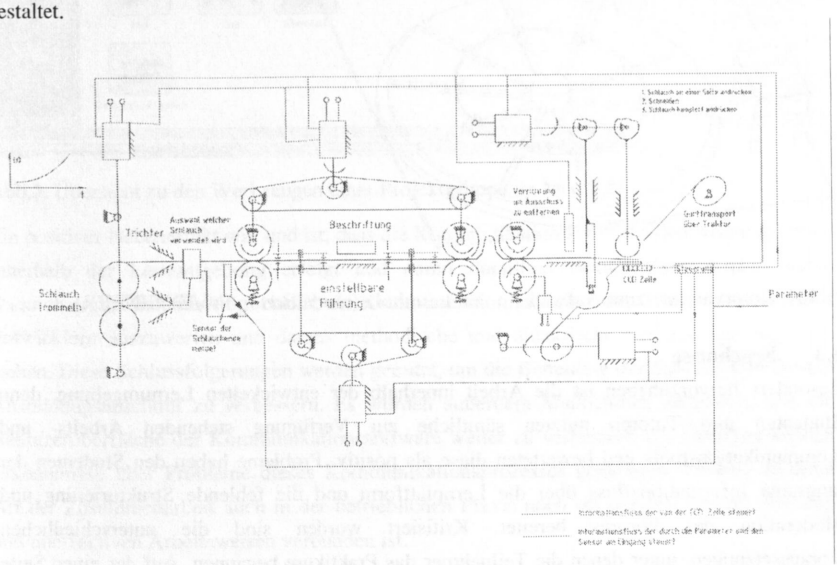


Abb.3: Beispiel für eine in ProTeachNet abgelegte Prinzipskizze

Die Aufgabenverteilung regelten die Teams unter sich, wobei sich im Wesentlichen an der Funktionsstruktur und entsprechend der Kompetenzen und Interessen orientiert wurde. Auf einem Abschlusstreffen zum Semester-Ende präsentierte jedes beteiligte Team seinen Lösungspart. Höhepunkt des Studentenprojektes war der Zusammenbau der einzelnen, unabhängig voneinander modellierten Bauteile bzw. Baugruppen. Die Zusammenarbeit aller Teams gestaltete sich sehr produktiv; praxisnahe Probleme spielten auch in dieser virtuellen Umgebung eine große Rolle, so dass die Studenten gezwungen wurden, einen gemeinsamen Nenner zu finden und sich zu arrangieren, was eine endgültige Lösung betraf. Als unangenehm wurde lediglich die begrenzte Zeit empfunden, die für diese eher komplexe Aufgabe zur Verfügung stand.

3.2.2 Die Folgevariante

In Rostock wurde eine Aufgabe bearbeitet, die die Entwicklung einer Vorrichtung zum Aufwickeln von Leimholz zum Inhalt hatte. An der Lösung arbeiteten zwei Teams zu jeweils drei Studenten. Als Umgebung zur Aufgabenbearbeitung wurde die Lernplattform genutzt, auch wenn es keine Entfernungen bezüglich der Standorte gab. Studenten und Tutoren nutzen wiederum die bereitgestellten Tools, legten Daten ab und kommunizierten in ProTeachNet.

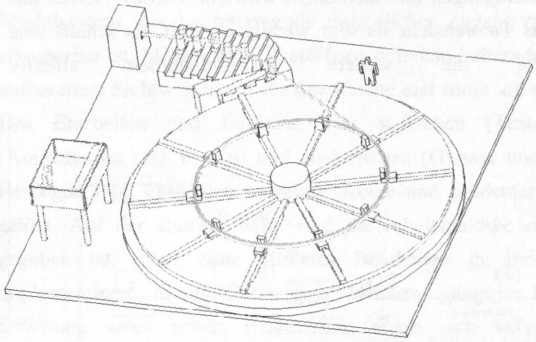


Abb.4: Rotorvariante zum Aufwickeln von Leimholz (modelliert in Pro/ENGINEER)

3.3 Ergebnisse

Besonders hervorzuheben ist die Arbeit innerhalb der entwickelten Lernumgebung, denn Studenten und Tutoren nutzten sämtliche zur Verfügung stehenden Arbeits- und Kommunikationstools und bewerteten diese als positiv. Probleme haben den Studenten der langsame Informationsfluss über die Lernplattform und die fehlende Strukturierung und Moderation des Forums bereitet. Kritisiert worden sind die unterschiedlichen Voraussetzungen, unter denen die Teilnehmer das Praktikum begannen. Auf der einen Seite waren das die fachlichen, bedingt durch die unterschiedlichen Lehrmodi an den Hochschuleinrichtungen, und andererseits die hard- und softwaretechnischen Voraussetzungen zum System. Das Gruppenklima wurde von allen teilnehmenden Studenten als sehr angenehm empfunden. Mt den Mitteln von ProTeachNet konnte erstmals ein neues Element der Ausbildung in der Lehre eingeführt werden. Die damit erworbenen Fähigkeiten der Kommunikation und Organisation der Zusammenarbeit verschiedener, örtlich getrennter Arbeitsgruppen werden im Zeitalter der Globalisierung noch an Bedeutung gewinnen und deshalb in Zukunft ein wichtiger Baustein in der Ausbildung sein. Die Erfahrungen beider Konstruktionsprojekte sind insgesamt als sehr erfolgreich zu bewerten, so dass die Vertreter der beteiligten Hochschulen beschlossen haben, zukünftig jährlich ein Projekt dieser Art mit Studenten durchzuführen.

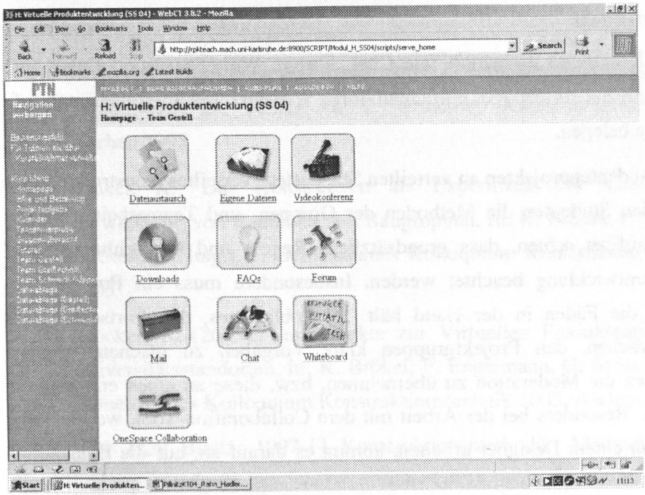


Abb.5: Übersicht zu den Werkzeugen einer Projektgruppe im Modul H

Ein positiver Nebeneffekt war und ist, dass die Kommunikation zwischen den Arbeitsgruppen innerhalb der Lernumgebung erfolgt und damit detailliert dokumentiert werden kann. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Kommunikation zwischen den Teams und einzelnen Entwicklern auszuwerten und daraus methodische und didaktische Schlussfolgerungen zu ziehen. Diese Schlussfolgerungen werden genutzt, um die Betreuung der Studenten in diesem Ausbildungsabschnitt zu verbessern. Es wurden außerdem Maßnahmen abgeleitet, wie die Benutzeroberfläche der Kommunikationssoftware weiter zu verbessern ist. Überdies können Erkenntnisse über Probleme dieses Kommunikationsprozesses gewonnen werden, da diese Art der Zusammenarbeit auch in der betrieblichen Praxis noch oft mit viel innerer Reibung und uneffektiven Arbeitsweisen verbunden ist.

4 Weitere Erfahrungen und Erkenntnisse

Die Akzeptanz eines Collaboration-Tools wie OneSpace hängt wesentlich von den trainierten Fertigkeiten im Umgang mit solch einem System zusammen. Es stellt den Abschluss oder zumindest einen gewissen Höhepunkt des verteilten Konstruierens dar. Die Arbeit mit dem Collaboration-Tool als Ergänzung zur Videokonferenz – beides zusammen stellt praktisch die Konstruktionskonferenz dar – litt oft unter dem Mangel einer detaillierten Ablaufplanung und eines konsequenten Managements. So kam es, dass mitunter mehrere Studenten zugleich im OneSpace-Designer tätig waren, wodurch die Übersicht verloren ging, von wem welche Aktion ausgelöst wurde. Dies verzögerte auch das Erreichen des Gesamtergebnisses – die fertig zusammengesetzte Baugruppe. Insgesamt mangelte es den Studenten noch an einer durchgehend methodischen Herangehensweise an die Bearbeitung der Konstruktionsaufgabe gerade auch im Hinblick auf das Arbeiten als Gruppe bzw. Team.

5 Schlussfolgerungen

Den Studenten stehen Kommunikationstools wie Chat, Forum, Whiteboard und Email zur Verfügung; sie können eigene Homepages einrichten, ihren Wissensstand überprüfen und auf sie zugeschnittene Kurse belegen.

Das Durchführen von Studentenprojekten an verteilten Standorten (verteiltes Konstruieren) ist ein geeignetes Mittel den Studenten die Methoden der Gruppen- und Teamarbeit nahe zu bringen. Dabei ist darauf zu achten, dass grundsätzliche Regeln und Empfehlungen der Methoden der Produktentwicklung beachtet werden. Insbesondere muss ein Projektleiter festgelegt werden, der die Fäden in der Hand hält. Ihm obliegt es, den Fortschritt der Projektarbeit zu überwachen, den Projektgruppen klare Vorgaben zu machen, in den Konstruktionskonferenzen die Moderation zu übernehmen, bzw. diese an einen engagierten Studenten zu delegieren. Besonders bei der Arbeit mit dem Collaboration-Tool, wo mehrere Bearbeiter gleichzeitig in einem Designer arbeiten, kommt es darauf an, auf die Einhaltung klarer Regeln zu achten. Diese sind:

- eine Reihenfolge des Ladens der Bauteile ins Collaboration-Tool muss festliegen,
- diese Reihenfolge bestimmt auch die Reihenfolge des virtuellen Zusammenbaus,
- es wird immer nur ein Team bzw. ein Bearbeiter mit Aktionen im Designer beauftragt,
- klare Vorgaben für die Wahl von Bezügen (Kanten, Achsen, Seiten usw.) erleichtern das Zusammenfügen von Bauteilen.

In den Bearbeitungsphasen vor dem Zusammenbau kommt es während der Konstruktionskonferenz darauf an, welcher Hierarchie die Elemente der gesamten Funktionseinheit unterliegen. Das bedeutet, dass zu klären ist, welche Bauteile zuerst dimensioniert und entworfen werden müssen, weil dadurch die Randbedingungen und Anschlussmaße für die übrigen Teile festgelegt werden. Diese Bauteile der ersten Entwurfsphase können die Hauptfunktionsträger des Gesamtsystems sein. Es können sich aber auch Rückkopplungen anderer Teile ergeben, die auf Grund der zu ertragenden Belastungen die eigenen Dimensionen bestimmen und damit auch die Anschlussmaße benachbarter Teile festlegen.

Eine wichtige Erkenntnis aus den durchgeführten Studentenprojekten innerhalb des ProTeachNet-Moduls "H – Virtuelle Produktentwicklung" mittels der durchgeführten Konstruktionskonferenzen liegt darin, dass den Studenten im Rahmen einer konstruktiv methodischen Ausbildung Prinzipien der Gruppenarbeit vermittelt werden müssen. Dazu gehören vor allem die System- und Problemstrukturierung sowie ein ausgearbeitetes Projektmanagement.

Literatur

[1] Brökel, K.: Berechnen und Konstruieren in verteilter CAD-Umgebung. in: Brökel, K.; Schlottmann, D.; Scharr, G.: 2. Workshop Konstruktionstechnik. Shaker Verlag Aachen 1998

[2] Brökel, K.: Das Konstruieren als Experiment mit virtuellen Prototypen zur Entwicklung von Bauteilen und Baugruppen. In: K. Brökel, F. Engelmann, G. Scharr, R. Stelzer (Hrsg.). 1. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2003, Aachen 2003

[3] Klöcker, S. (2003). Lernprojekte zur Virtuellen Produktentwicklung an verteilten Universitätsstandorten. In: K. Brökel, F. Engelmann, G. Scharr, R. Stelzer (Hrsg.). 1. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2003, Aachen 2003, 105-114

[4] VDI 2222 Blatt1: 1997-11 Konstruktionsmethodik; Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien

[5] VDI 2223: 2004-01 Methodisches Entwerfen technischer Produkte

Objektorientierte Produktmodellierung zur Unterstützung der Demontagegerechtigkeit

Peter SIGALOV

Universität Russe

Keywords

Konstruktionsprozess, Demontagegerechtigkeit, Bildverarbeitung, Lernen, Unterstützen

1 Einführung

In der umfassenden und sich immer genauer detaillierenden Systematik der Entwicklung umweltgerechter Erzeugnisse im Maschinenbau gewinnt die Demontageeignung des Gesamtproduktes immer mehr an Bedeutung. Prinzipiell hat dieses wichtige Teilproblem der Gesamtproblematik der Entwicklung umweltgerechter Erzeugnisse [1] zwei grundlegende Aspekte: einen Topologischen und einen der Demontagekräfte. Der topologische Aspekt befasst sich mit der Struktur der Montageeinheiten und deren Zusammensetzung zu Aggregaten und zu einem Gesamtprodukt. Wenn wir diese Problematik innerhalb des generellen Vorgehens beim Entwickeln und Konstruieren nach [2] betrachten, so ergibt sich ein Spielraum für das Optimieren der topologischen Demontagefähigkeit, vor allem innerhalb der Phase des Entwerfens. Bezugnehmend auf [3] und unter Einbeziehung der applikationsfähigen gegenwärtigen Softwareentwicklungen, ergeben sich manche nutzbare Reserven zur Optimierung durch rekursive Dekomposition und Anpassung bei der Gestaltung, insbesondere von Montageeinheiten bei denen Form- und Kraftschlussverbindungen beteiligt sind. Vor allem in den ersten Schritten der Phase der Gestaltung sind Teillösungen mit Hilfe des morphologischen Kastens – s. Bild 2 - zu generieren und bezüglich ihrer Demontageleichtigkeit zu bewerten [4].

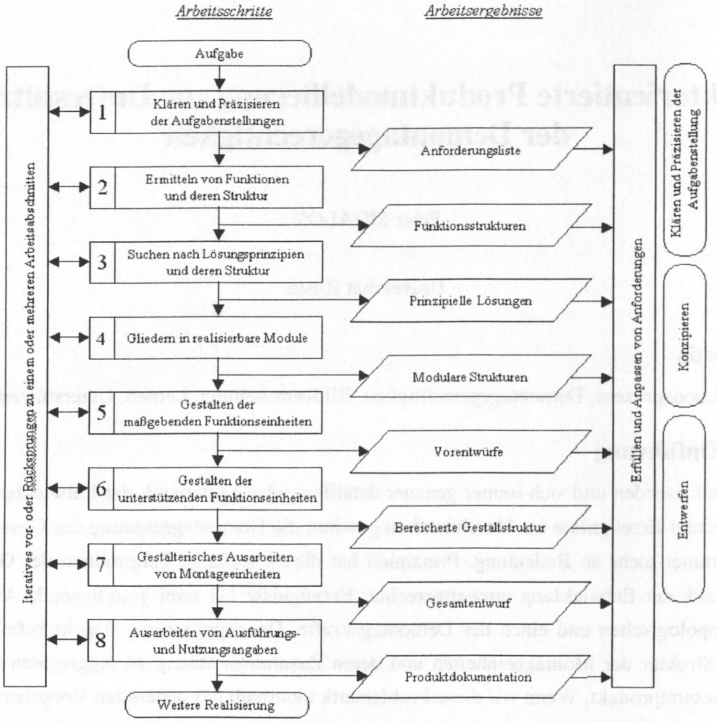


Abb.1. Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [2]

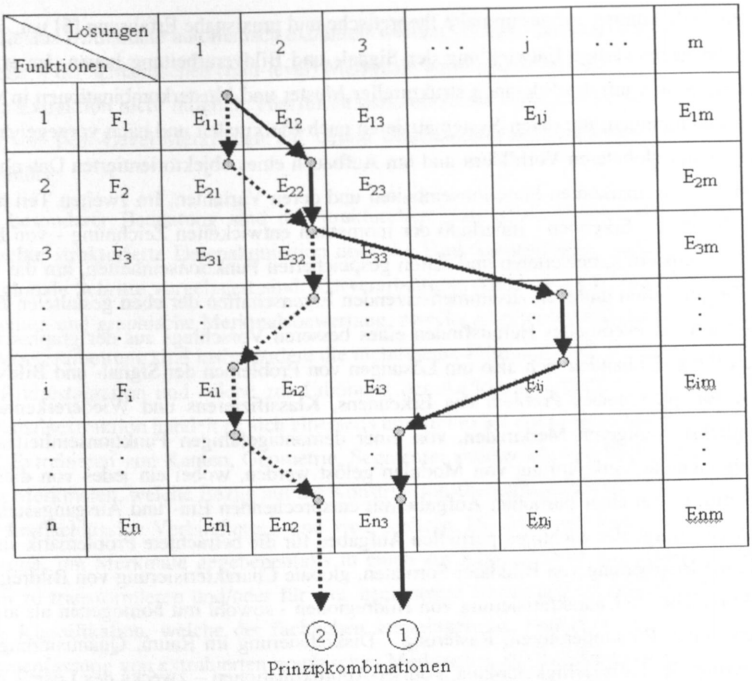


Abb.2. Kombination zu Prinzipkombinationen, welche die Gesamtfunktion durch unterschiedliche Lösungsprinzipien der einzelnen Teilfunktionen erfüllt

2 Vorgehensweise

Ein intelligentes Informationssystem zur Optimierung der Demontageeignung während des Konstruktionsprozesses soll mehr oder weniger zwei grundlegende Forderungen erfüllen und dementsprechend zwei relativ selbständig funktionierende Teile haben:

- Der eine Teil lernt von Zeichnungen und Bildern, und baut eine objektorientierte Datenbank mit Funktionseinheiten, welche sich, nach gewissen Abständen der Datenbereicherung, durch ein intelligentes Modul, mit Angaben -Bewertungskoeffizienten bezüglich der Demontagefähigkeit und des Einflusses einzelner Gestaltelemente innerhalb einer Funktionseinheit - weiterhin belegt.
- Der andere Teil setzt sich beim gestalterischen Entwickeln eines neuen technischen Gebildes ein. Gemeint wird, dass dabei dem Entwickler während der Arbeit parametrisierte Daten über die Demontagefähigkeit der einzelnen Funktionseinheiten und des technischen Gebildes insgesamt dargestellt und bessere Lösungen, die von der vorhandenen objektorientierten Datenbank sich zweckentsprechend zusammensetzen, dargeboten werden.

Die beiden Teile können auf gesammelte theoretische und praxisnahe Erfahrung [5] u.a., aber auch auf die gegenwärtige Entwicklung der Signal- und Bildverarbeitung bauen. Im ersten Teil handelt es sich um das Erkennen struktureller Muster und Musterkombinationen in vorhandenen Zeichnungen, um deren Systematisieren nach Merkmalen und nach vorgegebenen, idealisierten und globaleren Vorbildern und um Aufbauen eines objektorientierten Datenbank mit Graphiken der markanten Funktionseinheiten und deren Varianten. Im zweiten Teil handelt es sich um das Erkennen - innerhalb der momentan entwickelten Zeichnung - von Elementen der realisierten, bewerteten und schon gespeicherten Funktionseinheiten, um die Bewertung der partiellen und sich zusammensetzenden Eigenschaften der eben gestalteten Einheiten und um ein eventuelles Herausfinden eines besseren Vorschlags aus der graphischen Datensammlung. Es handelt sich also um Lösungen von Problemen der Signal- und Bildverarbeitung. Ein praxisnahes Problem des Erkennens, Klassifizierens und Wiedererkennens nach möglichst wenigeren Merkmalen, von einer demontagefähigen Funktionseinheit soll durch zielgerichtete Verknüpfung von Modulen gelöst werden, wobei ein jedes von diesen Modulen zum Lösen einer partiellen Aufgabe mit entsprechenden Ein- und Ausgangsstellen entwickelt ist. Einige der wichtigen partiellen Aufgaben für die betrachtete Problematik sind: analysierende Bearbeitung von Bilddatei-Formaten, globale Charakterisierung von Bildregionen, punktumgebende Charakterisierung von Bildregionen - sowohl mit homogenen als auch mit inhomogenen Punktoperatoren, Rasterung - Diskretisierung im Raum, Quantisierung – Diskretisierung der Farb/Helligkeitsskala, Fourier-Approximationen – zwecks des Lösens der Invarianz-Problematik, die verschiedensten Arten von Filterung, Bildsegmentierung, Kantenerkennen und Skelettierung, Module zur Lösung von Klassifikationsproblemen, u.a. Durch ihre Verknüpfung und durch Anpassung ihrer Ein- und Ausgänge zu einem globaleren Bildverarbeitungsgraphen soll ermöglicht werden, Informationen über die Zeichnungspartien zu abstrahieren, welche anschließend in drei Levels gespeichert werden.

Im Wesentlichen sollen zu diesem Level folgende Daten gehören:

- Metadateien (high-level): Informationen über Urheberrechte, Autoren, Aufnahmebedingungen (Zeit, Ort, etc.) und abstrakte Inhaltskategorien (z.B. Genre von Firmen);
- Semantische (mid-level) Daten: Konkrete Beschreibung des Bildinhaltes, z.B. Zeichnungsmerkmale, enthaltene Objekte, Funktions- und Montageeinheiten usw.;
- Strukturelle (low-level) Daten: Merkmale, die sie durch Analyse direkt aus der Bildinformation extrahieren lassen, z.B. Farb- (Schraffur-), Kanten- und Texturcharakteristiken;

Alle diese Daten können eingesetzt werden, um den systematischen Zugriff auf visuelle Informationsquellen (z.B. Zeichnungen) zu ermöglichen. Eine typische Anwendung ist die merkmalsbasierte Suche, die es ermöglicht, auf Grund von strukturellen (low-level) Merkma-

len, die aus Bildinhalte automatisch extrahiert werden können, ähnliche Bilder zu bestimmen. Bezüglich der semantischen (mid-level) Merkmale ist hingegen in vielen Fällen eine automatische Extraktion nicht möglich. Hierfür ist dann normalerweise die Auswertung (Klassifikation) von Low-Level-Merkmalen auf Grund bestimmter vorzugebender Kriterien (Regeln) notwendig.

Von besonderer Bedeutung sind die strukturellen (low-level) Daten. Hier gehört die erwünschte strukturierte Datenakquisition über die Funktionseinheiten, welcher vier wichtige und globale Schritte vorgelagert sind: Vorverarbeitung, Merkmalsextraktion, Merkmalstransformation und graphische Merkmalsbewertung, zwecks graphischer Klassifikation. Methoden der Vorverarbeitung sind insbesondere die nichtlineare Filterung, evtl. stellenweise Methoden der Bildrestauration und solche zur Erhöhung der Auflösung mittels Interpolation. Bei der Merkmalsextraktion handelt es sich einerseits um Methoden der graphischen Bildverarbeitung wie: Extrahieren von Kanten, Geometrie, Segmente; andererseits um Extrahieren von fachlichen Merkmalen, welche Bezug auf die Konstruktionsthematik haben wie: Lagerungen, form- und kraftschlüssige Verbindungen und viele weitere. Die Merkmalstransformation wird angewandt, um Merkmale gegebenenfalls in einen zur Klassifikation geeigneteren Merkmalsraum zu transformieren und/oder für eine geeignetere Bewertung zu normieren. Die graphische Klassifikation, welche der fachlichen vorgelagert ist, besteht in einer geeigneten Zusammenfassung von extrahierten graphischen Merkmalen, in ihrer Bewertung und ihrem Vergleich mit a priori bekannten Merkmalskonstellationen, um hieraus Rückschlüsse aus dem im Bild vorhandenen Inhalt auf einer hohen Abstraktionsebene zu ziehen, um weiterhin zu der eigentlichen fachlichen konstruktiven Ebene zu erlangen.

Die Kantenerkennung erfolgt meist mittels Gradientenoperatoren, um Helligkeitssprünge in dem Bild zu identifizieren und zu untersuchen. Dabei ist es möglich, den Gradienten der lokalen Helligkeit als Kriterium heranzuziehen, um das Vorhandensein von Kanten zu erkennen. Zur Analyse vertikaler Kanten ist der horizontale Bildgradient, zur Analyse horizontaler Kanten der vertikale Bildgradient heranzuziehen. Die Kantenanalyse bedient sich weiterhin u.U. einer Fourier-Transformation, wobei sich günstige Eigenschaften für die Erkennung bekannter Konturen, unabhängig von deren Lage (Translation), Größe (Skalierung) und Orientierung (Rotation) ergeben. Es ist günstig für die Problematik der Bildverarbeitung ein vorhandenes System heranzuziehen, welches zielgerichtete Entwicklung eines Signalgraphen für die Bilderkennung von Montageeinheiten in Zeichnungen und evtl. auch in anderen Bilddokumenten gestattet. In dem nächsten Punkt sind kurz die für das Ziel wichtige Eigenschaften eines solchen Systems [6] skizziert. Es ist jedoch an dieser Stelle zu erwähnen, dass, soweit es bekannt ist, kein Bildbearbeitungssystem ohne Hinzufügen weiterer Module diese Aufgabe lösen kann. Es handelt sich vor allem um die Notwendigkeit neuer Module, die eine Korrespondenzanalyse gewährleisten und nach Vergleichskriterien sortieren und wieder auswählen können. Dafür sollen entsprechende Modulen, die auf der Basis von Neuronalen Netzen funk-

tionieren können, für Realisieren des Vergleichens und Sortierens entwickelt werden. Ein weiteres Problem, welches durch Bereicherung des Systems für Bildverarbeitung gelöst werden kann, ist das Problem der Invarianz der Abbildung. Es handelt sich um das Wiedererkennen von Struktur- und Formmerkmalen beim Auftreten der Abbildung einer Funktionseinheit in Fallen von Positions-, Skalierungs- und Rotationsvarianten. Diese Problematik bedarf einer besonderen Betrachtung und die Lösung kann durch Anwenden von Fourier- oder Wavelet-Approximation gefunden werden.

3 Signal- und Bildverarbeitung mit Hilfe eines modular aufgebauten Entwicklungssystem *)

Die gegenwärtige Softwareentwicklung bietet manche gut geeignete Software-Produkte, die das betrachtete Problem maßgebend ermöglichen, beeinflussen und erleichtern können. Es handelt sich um die Möglichkeit, aus einzelnen Modulen, ein jedes von denen eine partielle Aufgabe lösend, Bildbearbeitungskette (Signalgraph zur Bildbearbeitung) zu gestalten, um: einerseits, Abbildungen in Zeichnungen und anderen Bildern zu identifizieren, andererseits, beim Entwickeln einer neuen Zeichnung Abbildungen aus dieser zu erkennen und mit Elementen in der vorhandenen graphischen Datenbasis zu vergleichen.

Ein führendes Software-Produkt in dieser Richtung, der für einen wichtigen Teil des betrachteten Vorhabens – Akquisition von graphischen Daten und nachfolgendes Suchen graphischer Objekte - passend sein kann, ist ICONNECT [6].

*) Die aufgeführten Überlegungen stützen sich vor allem auf das System ICONNECT [6] welches vom Firma Micro-Epsilon zusammen mit der Universität Passau entwickelt ist.

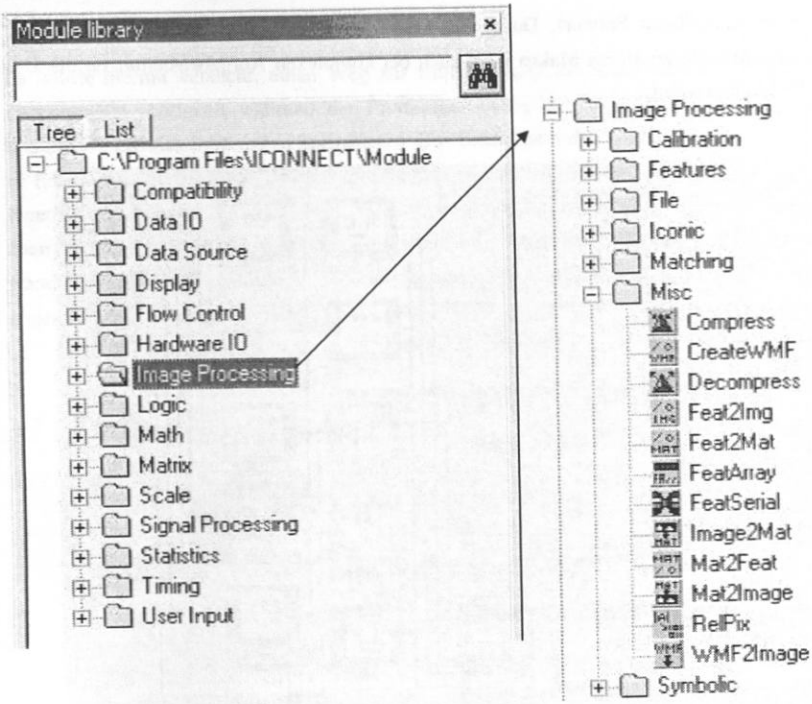


Abb. 3. Instanzierung und Verdrahtung einzelner Module zwecks Generierens ausführbarer Applikationen

Das oben aufgeführte Bild schildert – zwar oberflächlich und nur kurz-informativ - an dieser Stelle die Bibliothek mit Modulen, aus welchen ein Bildverarbeitungsgraph zusammengestellt werden kann. Die Module sind nach ihren Modultypen gruppiert und in einem Tree angeordnet. Das unten gezeigte Bild soll eine erste Vorstellung über einen Signalgraph für Bildverarbeitung vermitteln. ICONNECT ist ein Entwicklungs- und Laufzeitsystem für Signalverarbeitungsaufgaben der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. In einer graphischen Oberfläche wird ein Signalgraph erstellt, der den Datenfluss eines komplexen Ablaufs beschreibt. Ein Signalgraph besteht aus Modulen oder Modulinstanzen, welche die Knoten des Graphen repräsentieren, und Kanten. Der konsequent objektorientierte Ansatz von ICONNECT bildet dabei die Basis, um auf hoher Abstraktionsebene Programme realisieren zu können. Das Zusammenstellen von Teilalgorithmen zu einem komplexen Gesamtablauf auf einer graphischen Benutzeroberfläche geht dabei über die eigentlichen Möglichkeiten der objektorientierten Programmierung hinaus und ermöglicht dem Anwender durch eine weitestgehende Kapselung der Datentypen und eine mehrstufige Validierung einen außerordentlich leicht testbaren und

damit fehlerunanfälligen Entwurf. Durch die Möglichkeit des Zusammenfassens mehrerer verdrahteter Module zu einem Makro wird auch bei komplexen Aufgabenstellungen die Übersichtlichkeit gewahrt.

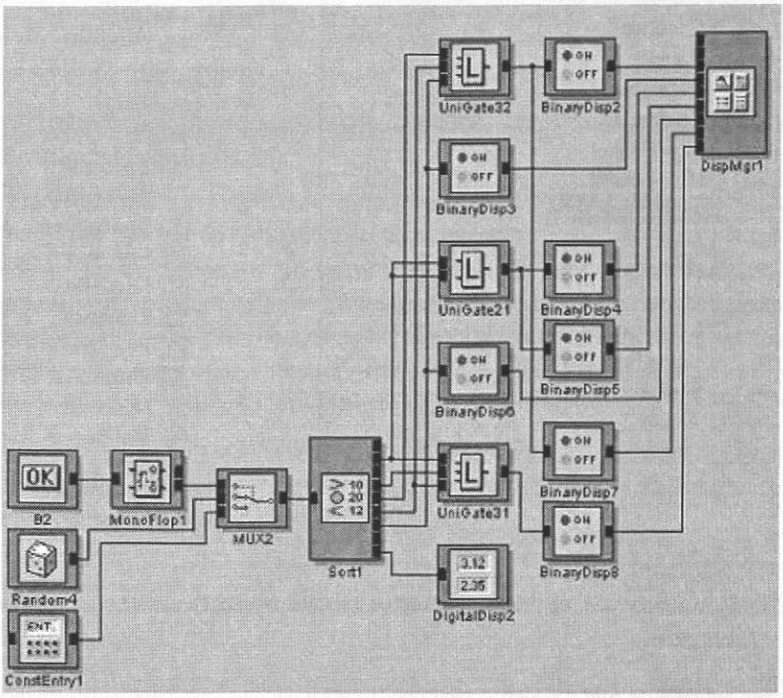


Bild 4. Erstellen von Applikationen durch visuelle Programmierung

Eine Modulinstanz repräsentiert einen mehr oder weniger aufwändigen Basisalgorithmus (Addition, Fourier-Transformation, Filter). Module können aber auch den Datenfluss bestimmen (z.B. MultiComm, ForNext etc.). Jedes Modul besitzt einen eindeutigen Namen (Modulname+Instanznummer) und einen Satz von Parametern. Jedem Modul ist auch eine Priorität zugeordnet, welche Einfluss auf die Bearbeitung des Signalgraphen hat. So genannte Ein-/Ausgangsports bilden die Schnittstelle eines Moduls zu anderen Modulen. Durch Definition von Parametern in modulspezifischen Dialogen sind die komplexen Variationsmöglichkeiten beim Anpassen von Modulen gewährleistet, was das folgende Bild zu veranschaulichen versucht.

4 Zusammenfassung

Es wurde hiermit versucht, einen Weg zur Unterstützung des Konstrukteurs bezüglich der Demontagegerechtigkeit während der Produktgestaltung durch ein intelligentes, lernendes und informierendes Systems zu konzipieren. Das Entwickeln des Systems baut auf vorhandene Erfahrung und auf die in den letzten Jahren entwickelten hard- und vor allem softwaremäßigen Voraussetzungen der Bildverarbeitung. Eine weitere Entwicklung, die von einem solchen System gewährleistet werden soll, besteht in dem Aufbauen von Modulen für die angewandte und fachlich-konkrete Bilderkennung sowie in der Bildklassifizierung von praxisbezogenen Gestalteinheiten.

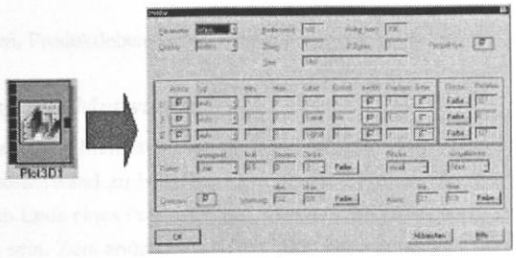


Abb.5. Anpassen von Modulen durch Parametrisieren

Literatur

[1] Klose, J. u.a.: COMMET – Informationssystem zur Entwicklung umweltgerechter Erzeugnisse. Abschlußbericht über ein Forschungsprojekt, gefördert unter dem Az.: 09528 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt; Dresden: TU Dresden, 1999

[2] VDI-Richtlinie 2221; Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; Düsseldorf: VDI, 1993

[3] Fritzsch, W., Klose, J. u.a.: Taschenbuch Maschinenbau, Band 4, Kapitel 4.3. Berlin: Verlag Technik

[4] VDI-Richtlinie 2225, Blatt 3; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Technisch-wirtschaftliche Bewertung; Düsseldorf: VDI, 1998

[5] Gubsch, M.: Automatische Erfassung technischer Dokumentationen. Proc.INFO 88 22. bis 26. Febr. 1988 Dresden. Berlin 1988, S. 287-289

[6] Unterlagen für das Produkt ICONNECT – Applikationsgenerator für die industrielle Bereiche: Messen, Steuern, Regeln, Automatisieren. Firma Micro-Epsilon D-94496 Ortenburg, iconnect@micro-epsilon.com

Zuverlässigkeit und Lebenszykluskosten als konstruktive Entscheidungskriterien im Produktentwicklungsprozess

Henrik SCHNEGAS

Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design

Keywords

Lebenszykluskosten, Produktlebensdauer, Zielkostenmanagement, Zuverlässigkeit

1 Einleitung und Motivation

Es ist ein alter Traum des Menschen, für ein technisches Produkt nur soviel Material-, Fertigungs- und Betriebsaufwand zu betreiben, wie für die gewöhnliche Nutzungszeit unbedingt erforderlich ist. Am Ende eines Produktlebens sollten die in Geld bewertbaren Aufwendungen zum einen niedrig sein. Zum anderen sollte der Wert eines Produktes im betriebswirtschaftlichen Sinn "aufgezerrt" sein.

Für die Realisierung eines solchen Produktes sind umfassende technische und betriebswirtschaftliche Fragen zu beantworten, wie z.B.

- *Wie lange soll das Produkt genutzt werden? ⇨ Produktlebenszeit, Betriebszeit*
- *Wie ist das Ausfallverhalten der Produktkomponenten? ⇨ Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t*
- *Ist der Kunde bereit, etwas für sein Produkt zu tun? ⇨ Wartung, Instandhaltung, Reparatur*
- *Was darf die Herstellung bzw. die Anwendung kosten? ⇨ Grenz- und Zielkosten*

Unumstritten liegt die konstruktive Umsetzung dieser Fragen in der Verantwortung der Konstrukteure, denen aber so gut wie keine Handwerkszeuge zur Verfügung stehen, die genannten Schwerpunkte wie Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Instandhaltung und Kosten quantitativ während der Konzept- und Entwurfsphase umzusetzen.

Konstrukteure dimensionieren ihre Produkte in der Regel ohne Berücksichtigung von erforderlichen Lebensdauern oder das statistisch beschreibbare Ausfallverhalten. Instandhaltungs- und kostengerechtes Konstruieren ist zwar ein konstruktives Grundprinzip, aber die konkrete

Instandhaltungsplanung bzw. Kostenkalkulation wird noch immer erst nach Vollendung der virtuellen Produktentwicklung aktiv durch andere Abteilungen durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag stellt im ersten Abschnitt eine Möglichkeit vor, mit der Produktlebensdauern bzw. mit Blick auf Wartung und Instandhaltung einzelne Nutzungsabschnitte festgelegt werden können, die dann mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie (RCM, RCD) als abrechenbare Konstruktionskriterien während des Konstruktionsprozesses für die Auslegung zur Verfügung gestellt werden können.

Im zweiten Abschnitt wird mit Hilfe des betriebswirtschaftlichen Zielkostenmanagements (Target Costing) für Konstrukteure ein Weg aufgezeigt, auf dem ein angestrebter Produktpreis bereits in der Konzeptphase auf Funktionen bzw. Komponenten aufgeteilt werden kann.

2 Lebensdauer und Zuverlässigkeit als Auslegungskriterien

Betrachten wir die einzelnen "Lebensabschnitte" eines Produktes mit den charakteristischen Phasen Planung, Konzept, Entwurf, Beschaffung, Fertigung, Lagerung, Versand, Anwendung, Instandsetzung, Entsorgung und Recycling, kann besonders der Abschnitt von der Anwendung bis zur Entsorgung mit einer spezifischen Nutzungszeit definiert werden. Wie lang diese Nutzungszeit ist, kann durch Konstrukteure oft nur unzureichend beantwortet werden.

Als *neuer Gedanke* für die Konstruktion ist die Verwendung der betriebswirtschaftlichen AfA-Zeiten anzusehen, die durch den Bundesminister für Finanzen herausgegeben werden und den durch die Oberfinanzdirektionen ermittelten betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauern z.B. für Maschinen entsprechen. Die AfA-Zeiten sind ein betriebswirtschaftlich sinnvolles Lebensdauermaß einer Maschine oder Anlage. In der *Tabelle 2* sind aus den amtlichen AfA-Tabellen einige maschinenbauliche Nutzungsdauern aufgeführt, die durch die Konstruktion zu verfeinern sind. Da die AfA-Zeiten auch ohne unmittelbaren Betrieb gelten, sind die Zeiten auf wahrscheinliche Beanspruchungsbetriebszeiten zu transformieren. Vorgeschlagen wird deshalb zur Ermittlung der zu realisierenden Gesamtnutzungszeit t_{ges}

$$t_{ges} = k_{ti} \cdot t_{AfA} . \qquad (1)$$

k_{ti} ist ein einsatzabhängiger Abminderungsfaktor (*siehe Tabelle 1*) und t_{Afa} die Afa-Zeit, die den amtlichen Tabellen entnommen werden kann (*siehe Tabelle 2*).

Betriebstage je Jahr	Schicht	Stunden	k_{ti}
365	24 h	8760 h	1,00
252	2 x 8 h	4032 h	0,46
252	1 x 8 h	2016 h	0,23

Tabelle 1: Abminderungsfaktoren k_{ti}

Weitere Reduzierungsanteile durch Rüstzeiten, Erholzeiten u.a. sind produktspezifisch zu berücksichtigen. Für den EKP ist weiterhin eine Transformation von den Lebensdauern mit Zeiteinheit auf Lebensdauern z.B. mit Lastwechsel-, Umdrehungs- oder Verschleißwegcharakter notwendig, da sie Bestandteil der Auslegungspraxis sind.

Produkt	AfA-Zeit t_{Afa} [Jahre]	Produkt	AfA-Zeit t_{Afa} [Jahre]
Richtmaschinen	12	Pumpen (Schiffbau)	7
Bohrmaschinen	10	Schneid- und Schweißanlagen	7
Schleifböcke	10	Spezialdrehbänke	6
ortsfeste Kraftmaschinen (Schiffbau)	10	Werkzeug-Drehmaschinen	6
Schmiedepressen	10	Biegemaschinen	5
Benzinmotoren	8	CNC-Drehmaschinen	5
Dieselmotoren	8	CNC-Fräsmaschinen	5

Tabelle 2: Beispiele für Abschreibungszeiten t_{Afa}

Eine so definierte Lebensdauer ist natürlich kein absoluter Zeitpunkt. Bei Betrachtung einer größeren Anzahl gleicher Produkte unterliegt die Lebensdauer den Gesetzen der Stochastik. Traditionell ist die Lebensdauer als Zufallsvariabel mit einer Wahrscheinlichkeit verbunden, die im Maschinenbau mit der Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit als oberste Qualitätseigenschaft gleichgesetzt wird.

In Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitsverhalten eines zu konstruierenden Gebildes ist die definierte Gesamtnutzungszeit bei Bedarf in Teilnutzungszeiten zu unterteilen, die mit Instandhaltungsintervallen gleichzusetzen sind. Ein Maß für die Anzahl der Instandsetzungsintervalle ist die geforderte Zuverlässigkeit. Die *Abbildungen 1* und *2* zeigen die Variation der Intervalle in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit. Mit zunehmender Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t verringern sich die Instandsetzungsintervalle.

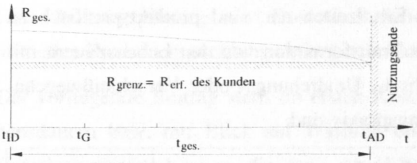


Abb. 1 Zuverlässigkeitsverlauf ohne Erneuerung

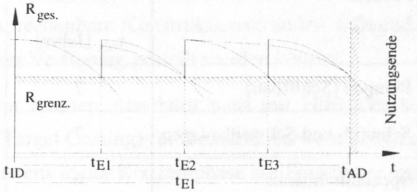


Abb. 2 Intervallgestaltung durch Zuverlässigkeitsänderung

Errechnet werden kann die Intervallzeit in Abhängigkeit von der geforderten Zuverlässigkeit $R_{grenz.}$ und den für das betrachtete Gebilde typischen stochastischen Größen T und ß mit

$$t_{Ei} = T_S \cdot \sqrt[\beta_S]{-\ln R_{grenz}} \,. \tag{2}$$

Unter Annahme einer kontinuierlichen Arbeit und Aufteilung der Gesamtnutzungszeit $t_{ges.}$ in n gleiche Instandhaltungsintervalle Δt_E ergibt sich die Gesamtnutzungszeit mit:

$$t_{ges.} = n \cdot \Delta t_E \,. \tag{3}$$

3 Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der Auslegungspraxis

Die Dimensionen eines technischen Gebildes werden im einfachsten Fall in Abhängigkeit von der Belastung und der Werkstofffestigkeit bestimmt. Während die Belastung eine konstruktiv nicht beeinflussbare Größe ist, kann die Werkstofffestigkeit, die als Beanspruchbarkeit in die Auslegung eingeht, in Abhängigkeit von der Lebensdauer und geforderten Zuverlässigkeit variiert werden.

Unter Verwendung der Weibullverteilung kann die Beanspruchbarkeit $B_{zul.}$ in Abhängigkeit von der Lebensdauer (z.B. Intervallzeit t_E) und Zuverlässigkeit $R_{erf.}$ mit

$$B_{zul.} = B_N \cdot \sqrt[a]{\frac{t_N}{t_E}} \cdot \sqrt[a \cdot \beta]{\frac{\ln R_{erf.}}{\ln R_N}} \tag{4}$$

ermittelt werden und in den nachfolgend dargestellten, wie auch allen nicht dargestellten Dimensionierungsgleichungen berücksichtigt werden. (*siehe Tab. 3*) *Gleichung 4* ist hierbei für dynamische Beanspruchungen relevant.

Längsbeanspruchung Zug / Druck	Biege- beanspruchung	mittlere Schub- oder Tangential- beanspruchung	Torsion
$A_{erf.} \geq \frac{F}{B_{zul.z/d}}$	$W_{erf.} \geq \frac{M_b}{B_{zul.b}}$	$A_{erf.} \geq \frac{F_Q}{B_{zul.\tau}}$	$W_{erf.} \geq \frac{M_t}{B_{zul.t}}$

Tabelle 3 Dimensionierungsansätze einachsiger Spannungszustand

4 Qualität und Kosten im Lebenszyklus

Bekannt ist die Tatsache, dass im Produktlebenszyklus die Kosten stetig ansteigen. Entsprechend bundesdeutschem Handelsgesetzbuch und Einkommenssteuerrecht kann zur Darstellung der Gesamtkosten eines Produktes das Kostenschema nach *Abbildung 3* genutzt werden. Die anwenderseitigen Kostenarten erlangen hierbei jedoch nur aus der Sicht der Entwicklung eines Produktes Gültigkeit. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind die Anwenderkosten in die Begriffe der herstellerseitigen Kostenarten zu übersetzen.

Graphisch kann der kontinuierliche Kostenzuwachs am einfachsten mit dem Gesamtkostenmodell nach Selivanov dargestellt werden (*siehe Abbildung 4*). Das Modell lautet:

$$LCC(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^n . \qquad (5)$$

Die Werte A, B und C sind durch die entsprechenden, hier nicht näher beschriebenen Kostenarten gemäß *Abbildung 3* zu bilden. Die *Abbildungen 4* und *5* zeigen die Kostenentwicklung in Abhängigkeit von der Qualität. Vorteils-Nutzen-Argumente wie Wartungsfreiheit, niedriger Instandhaltungsaufwand, niedriger Betriebsstoffaufwand sind erfahrungsgemäß mit höheren qualitativen und materiellen Aufwendungen verbunden, was für den Hersteller höhere Entwicklungs- und Fertigungskosten und für den Kunden in der Regel höhere Anschaffungskosten bedeutet. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet führt dieses jedoch zu niedrigeren Gesamtkosten. (*siehe Abb. 5*)

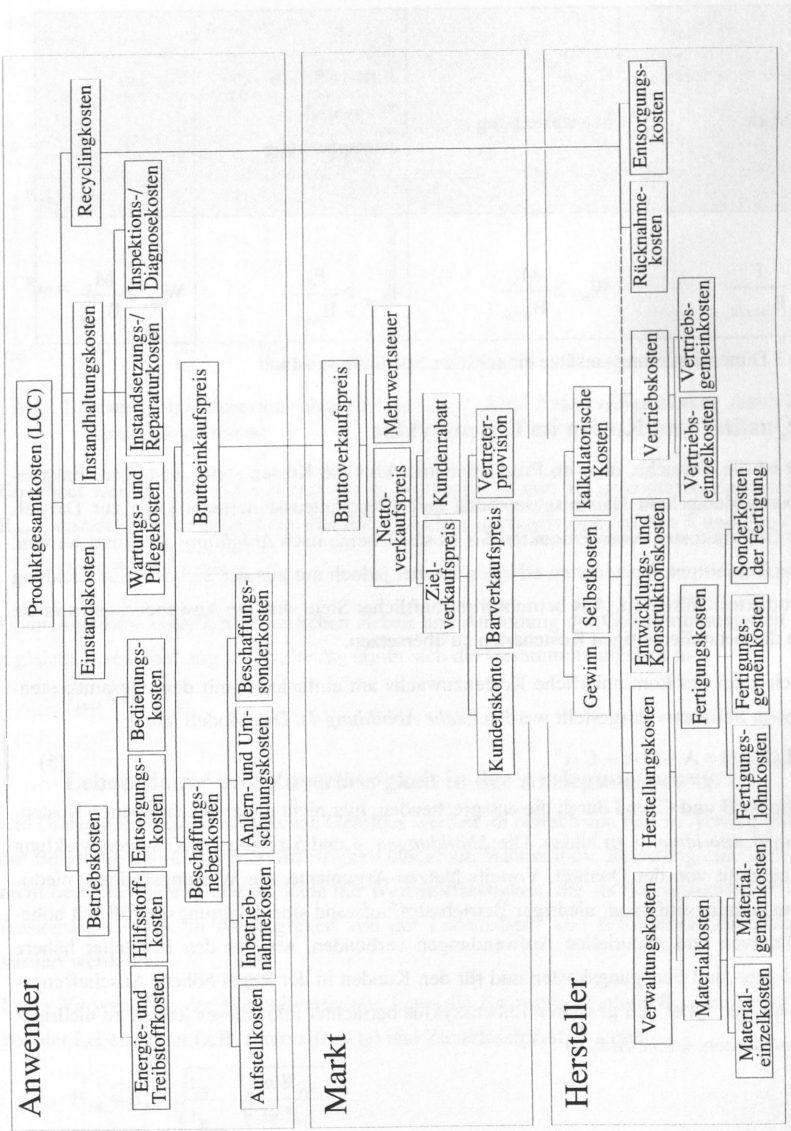


Abb.2 Systematisierung der Lebenslaufkosten

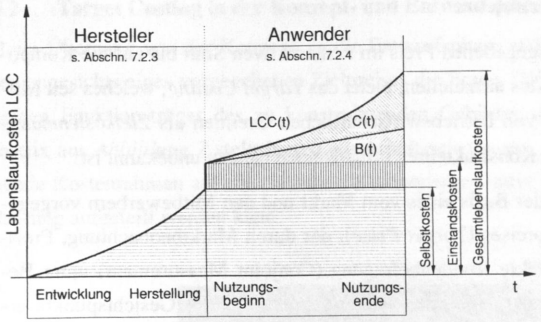


Abb. 3 LCC-Aufteilung (Selivanov)

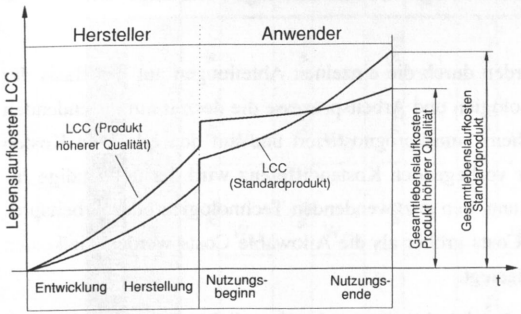


Abb. 4 LCC und Produktqualität

5 Retrograde Kostenaufteilung im Entwicklungsprozess

Entgegen den traditionellen Kostenbetrachtungen, bei denen erst nach der Entwicklung eines Produktes der Preis festgelegt wird, besteht immer häufiger die Notwendigkeit, vom Markt vorgegebene Preise retrograd auf die Wertschöpfungspartner aufzuteilen. Dem neuen Trend folgend bestimmt nicht mehr der Hersteller auf der Basis der aufgewendeten Kosten den Marktpreis, sondern der Markt bestimmt die im Unternehmen erlaubten Kosten.

Für die Konstruktionsabteilung bedeutet das genau wie für alle anderen Abteilungen die Vorgabe von Grenzkosten, die durch geeignete Wirkprinzipien, Werkstoffe, Geometrien und Fertigungstechnologien ohne Einschränkung der funktionellen und qualitativen Marktforderungen konstruktiv einzuhalten sind.

5.1 Target Costing für Konstrukteure

Einen Ansatz, den vom Markt vorgegebenen Preis im konstruktiven Sinn bis auf die Komponenten des herzustellenden Produktes aufzuteilen, bietet das *Target Costing*, welches seit Mitte der 90er Jahre in Deutschland von betriebswirtschaftlichen Gremien als *Zielkostenmanagement* diskutiert wird und gerade Konstrukteuren oftmals noch nahezu unbekannt ist.

Beim Target Costing werden auf der Basis eines vom Markt und den Mitbewerbern vorgegebenen wettbewerbsfähigen Marktpreises (*Target Price*), der durch Marktbeobachtung, Preisexperimente, Experten- oder indirekte Kundenbefragung (Conjoint Measurement) unter Berücksichtigung demographischer, geographischer und psychographischer Gesichtspunkte ermittelt werden kann, nach Abzug eines unternehmerisch angestrebten Gewinns *(Target Profit)* die maximal erlaubten Kosten (*Allowable Costs*) berechnet. Diese Kosten sind ein Abbild angestrebter Qualität, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Instandhaltungs-, Wartungs- und Reparaturbereitschaft.

In einem gegenläufigen Prozess werden durch die einzelnen Abteilungen auf der Basis der aktiv verwendeten Verfahren, Technologien und Arbeitsprozesse die derzeit aufzuwendenden Kosten (*Drifting Costs*) im klassischem Sinne prognostiziert und mit den erlaubten Kosten verglichen. In Abhängigkeit von der vorliegenden Kostendifferenz wird der notwendige Innovationsgrad bei der Produktgestaltung, den anzuwendenden Technologien oder Arbeitsprozessen abgeleitet. Sind die Drifting Costs größer als die Allowable Costs werden Zielkosten *Target Costs*) als Zwischenziele festgelegt.

Am Ende liegt für das herzustellende Produkt bereits vor der eigentlichen Entwicklungsarbeit in Zielpreis vor, der durch alle wertschöpfenden Komponenten und erforderlichen Fertigungshandlungen zwecks Wahrung des Produkterfolges eingehalten werden muss.

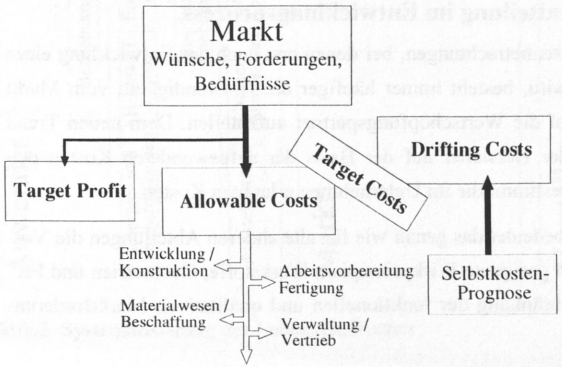


Abb. 5 Grundschema für das Zielkostenmanagement

5.2 Target Costing in der Konzept- und Entwurfsphase

Beim Übergang von der Konzept- in die Entwurfsphase stellt sich den meisten Konstrukteuren angesichts eines vorgegebenen Zielpreises die Frage, "Wie teuer dürfen denn nun die einzelnen Funktionsträger des zu konstruierenden Gebildes sein?". Die Zielkostenwichtungsmatrix aus *Abbildung 7* stellt hierzu ein Arbeitsschema vor, mit dem der zur Verfügung stehende Kostenrahmen auf die einzelnen Komponenten unter Beachtung der funktionellen Bedeutung aufgeteilt werden kann.

Komponenten	Funktionen 1		2		3		... i ...		f		
	w_1		w_2		w_3		w_i		w_f		100%
	w_{11}		w_{12}		w_{13}		w_{1i}		w_{1f}		
2	w_{21}	W_{12}	w_{22}	W_{22}	w_{23}	W_{32}	w_{2i}	W_{i2}	w_{2f}	W_{f2}	W_2
3	w_{31}	W_{13}	w_{32}	W_{23}	w_{33}	W_{33}	w_{3i}	W_{i3}	w_{3f}	W_{f3}	W_3
..j..							w_{ji}	W_{ij}			$..W_j..$
k	w_{k1}	W_{1k}	w_{k2}	W_{2k}	w_{k3}	W_{3k}	w_{ki}	W_{ik}	w_{kf}	W_{fk}	W_k
	100 %		100 %		100 %		100 %		100 %		100 %

Abb. 6 Wichtungsmatrix für die Kostenaufteilung eines Kostenrahmens

Nach der Wichtung der vom Markt geforderten Funktionen mit den Faktoren w_i, werden alle für das Produkt erforderlichen Komponenten in ihrer Wichtigkeit für die einzelnen Funktionen mit den Wichtungsanteilen w_{ji} prozentual beurteilt.

Das Produkt aus Funktionswichtung w_i und funktionsbezogener Komponentenwichtung w_{ji} ergibt den funktions- und komponentenbezogenen Wichtungsanteil W_{ij}. Es gilt

$$W_{ij} = w_{ji} \cdot w_i \qquad \text{mit } j = 1...k \text{ und } i = 1...f. \tag{6}$$

Die Wichtungsfaktoren w_i und w_{ji} können z.B. mit Hilfe der Präferenzmethode ermittelt werden. Aus der Summe aller Wichtungsanteile W_{ij} einer Komponente ergibt sich die Gesamtbedeutung der Komponente für das Gesamtprodukt.

Es gilt

$$\sum_{i=1}^{f} W_{ij} = W_j \tag{7}$$

Der Wichtungsfaktor W_j ermöglicht die prozentuale Zuordnung der erlaubten Grenzkosten zu den einzelnen Komponenten.

Die Kostenzuordnung erfolgt mit der Beziehung

$$\text{Wichtungsanteil } W_j \;\hat{=}\; \text{prozentualer Gesamtkostenanteil } K_j \tag{8}$$

$$\text{unter Berücksichtigung von } \sum_{j=1}^{k} W_j = 1 \text{ und } \sum_{j=1}^{k} K_j = 1. \tag{9}$$

Die so ermittelten Kosten ergeben den Kostenrahmen für die einzelnen Komponenten bzw. Komponentgruppen, der im EKP zur Verfügung steht und durch geeignete Wirkprinzipien und Wirkgeometrien unter Einhaltung geforderter Funktionalität, Qualität und Zuverlässigkeit umgesetzt werden muss. Werden die Grenzkosten merklich überschritten, werden Änderungen am Gesamtkonzept des Produktes erforderlich. Eine innovative Ideenfindung wird notwendig.

Literatur

[1] *Schlottmann, D.; Schnegas, H.*: Auslegung von Konstruktionselementen. Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinenbau., Springer Verlag, 2002.

[2] *Schnegas, H.*: Kosten- und zuverlässigkeitsbasierte Auslegungsmodelle maschinenbaulicher Produkte. Shaker Verlag, 2002.

FVK – ein besonderer Werkstoff im PLM

Jan BRÖKEL, Gerhard SCHARR

Universität Rostock

Abstract

Bei der Verwendung von Faserverstärkten Kunststoffen (FVK) müssen sich werkstoffspezifische Besonderheiten im Datenmanagementsystem abbilden und verwalten lassen, damit es ein konsistentes Datenabbild des gesamten Produktlebens gibt. Dazu sind Erweiterungen oder Änderungen einer metallorientierten Umgebung nötig, um die Potentiale der FVK voll ausschöpfen zu können. Die Anpassung erfordert das volle Bewusstsein des Anwenders über die Unterschiede zwischen metallischen Werkstoffen und FVK. Unterschiede gibt es in allen Produktlebenszyklusphasen. So sind in der Entwicklungsphase die aufwendige Werkstoffkonstruktion, in der Produktionsphase die zusätzlichen Fertigungsparameter, in der Nutzungsphase die komplexere Wartung und in der Recyclingphase Reparaturen und chemische Bestandteile abzubilden.

Keywords

PLM, FVK, Datenmanagement, Komposite, Produktentwicklung

1 Einleitung

Die Entwicklung und Anwendung von Kunststoffen und im Speziellen von faserverstärkten Kunststoffen ist in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter in den Massenmarkt vorgedrungen [4]. Laut [1] sind die Kraftfahrzeug- und die Luftfahrtindustrie die besonderen Entwicklungstreiber. Daneben werden relativ große Stückzahlen von Produkten aus Faserverstärktem Kunststoff z.B. im Yachtbau, bei Herstellern von Sturzhelmen und bei Sportgeräteherstellern erreicht. Zusätzlich zum Garantierecht gelten bei vielen dieser Produkte aufgrund ihrer Sicherheitsrelevants besondere Qualitäts- und Lebensdaueransprüche.

Um ein optimales Produkt anbieten zu können, heißt dies in den meisten Fällen:

1. Material reduzieren und/oder das eingesetzte Material besser ausnutzen. Also Materialkosten senken, die Zuladung erhöhen (bei Fahrzeugen), Bauräume verkleinern und eine bessere Handhabung von leichten Gebrauchsgegenständen (z.B. Fahrrad) gewährleisten,

2. Herstellungsprozesse optimieren. Indem der Ausschuss minimiert wird, Produktionszyklen verkürzen werden und Produktänderungen und Anpassungen effizient möglich sind,
3. Support und Gewährleistung garantieren durch eine umfangreiche und aussagekräftige Dokumentation und damit eine schnelle und einfache Bearbeitung bei Garantieansprüchen ermöglichen. Die Entsorgung und Recyclefähigkeit muss dem gesellschaftlichen Anspruch genügen.

Bei allen drei Hauptpunkten gibt es beim Einsatz von Faserverstärkten Kunststoffen materialspezifische Eigenarten im Product Lifecycle Management (PLM).

2 FVK

Im Gegensatz zu Metallkonstruktionen kann bei der Verwendung von FVK der Werkstoff nicht als Rohmaterial eingekauft werden, sondern wird im Rahmen der Produktherstellung entwickelt und gefertigt. Die Geometrie des Werkstoffes entspricht der des Produktes, da eine Umformung und Nachbearbeitung zur Schädigung des Werkstoffes (Fasern) und damit zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Produktes führt. FVK zeichnen sich prinzipiell durch eine hohe spezifische Festig- und Steifigkeit, ausreichende Zähigkeit, hohes E-Modul, gute Formstabilität, akzeptabler Preis, gutes Ermüdungsverhalten und niedrige Wärmedehnung aus [2]. Natürlich wird abhängig von den eingesetzten Komponenten immer ein Kompromiss eingegangen, da kein Werkstoff alle diese Qualitäten hat. Trotzdem bietet sich ein Verbundwerkstoff oft an und kann Metalle in vielen Bereichen ersetzen.

In einem Komposite dienen die Fasern als Hauptlastträger, sie bestimmen im Komposite maßgeblich die mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit. Die Matrix, in die die Fasern eingebettet sind, dient der Krafteinleitung, dem Schutz der Faser und gewährleistet eine gewisse Druckfestigkeit der Konstruktion. Verschiedenste Polymere in Form von Harzen, Granulaten und Pressmassen bedingen sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften und lassen den Einsatz von Kunststoffen in einem sehr breiten Produktspektrum zu. Bei heutigem Stand der Technik haben Duroplaste, meist Epoxid- oder Polyesterharze, die größte Anwendungsverbreitung. In polymeren Hochleistungsverbundwerkstoffen werden vor allem Aramid-, Kohlenstoff- und Glasfasern eingesetzt.

Gängige Halbzeuge sind Rovings, Matten und Gewebe, oder vorgetränkte Fasern wie Prepregs und Pressmassen. In der Anwendung sind FVK im Flugzeugbau, im militärischen Bereich und im Sportbereich am verbreitetsten. Daneben gibt es Anwendungen im Yacht- und Automobilbau. Interessante Beispiele sind ein Korvette der HDW (53m lang) aus CFK-Sandwich und Windkraftanlagenflügel (47m lang) aus GFK [7].

Die gleichzeitige Herstellung von Bauteil und Werkstoff bringt ein Höchstmaß an Flexibilität

beim Materialaufbau und der Geometrie. Basierend auf dieser Flexibilität sind FVK prädestiniert für die Integralbauweise [4]. Aufgrund ihrer Anisotropie sind analytische und numerische Berechnungen sehr anspruchsvoll und experimentelle Untersuchungen sind oft zur Validierung der Ergebnisse nötig.

3 PLM

Das Produkt Lifecycle Management (PLM) verwaltet sämtliche relevanten Daten eines Produktes über dessen gesamte Lebensdauer im Sinne des Konfigurationsmanagements vollständig und eindeutig [4].

Hierbei sind geometrische, technologische und organisatorische Daten gemeint, die in allen Bereichen und Phasen der industriellen Produktion entstehen. PLM steht also für Daten- und Prozessmanagement zusammen mit möglichst hoher Systemintegration [4].

Jedes Produkt durchwandert mehr oder weniger die Phasen: Vertrieb, Produktplanung, Produktentwicklung, Produktionsplanung, Produktion, Vertrieb, Produktnutzung, Produktstilllegung und Entsorgung. In all diesen Phasen entstehen Daten die das Produkt beschreiben und all diese Daten müssen systematisch bearbeitet und verwaltet werden. Es fängt an mit Kundenwünschen und Marktanforderungen im Vertrieb, geht über CAD Daten, Stücklisten und Prozessinformationen in der Konstruktion und Produktion bis hin zu Wartungsplänen, Demontageanleitungen und Gefahrgüterbeschreibungen. Die Gesamtheit dieser Daten, Dokumente und Dateien müssen beim Hersteller verwaltet und archiviert werden und in Auszügen den Behörden und Kunden zur Verfügung gestellt werden. So braucht ein Kunde nicht wissen, welche Temperaturen beim Herstellungsprozess auftreten müssen, die maximale Einsatztemperatur des Produktes ist für ihn dagegen wichtig. Einige Behörden vergeben Gütesiegel bei entsprechendem Nachweis von eingehaltenen Normen (z.B. ISO 9000) und die belegenden Informationen müssen über den gesamten Herstellungsprozess gesammelt und gebündelt werden. Bei Verwendung von FVK treten in einigen Phasen Besonderheiten auf, welche dem Anwender klar sein müssen.

4 FVK im PLM

In bestimmten Produktlebensphasen unterscheiden sich FVK von gängigen metallischen Materialien. Durch den engen Zusammenhang von Werkstoff, Bauteilgeometrie und Herstellungstechnologie ergeben sich Besonderheiten, welche sich auch im Produkt Lifecycle Management niederschlagen müssen. Das besondere Augenmerk, welches auf die Phasen Produktentwicklung, Produktion, Produktnutzung und Produktstilllegung gerichtet sein muss, soll am Beispiel einer KFZ Motorhaube gezeigt werden.

Produktentwicklung

Durch die Möglichkeit, gezielt anisotrope Werkstoffe zu konstruieren, um möglichst viele Fasern in die Hauptbelastungsrichtungen zu legen, ergibt sich für fast alle FVK-Bauteile eine komplexe Dimensionierung. Diese bewusst eingebrachte Anisotropie erzwingt meist nichtlineare numerische Analysen und zusätzliche Experimente, da nicht mit einem bekannten standardisierten Metall, sondern mit einem konstruierten Werkstoff gearbeitet wird. Durch die hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit der meisten FVK können leichtere Produkte mit geringerem Materialeinsatz und hoher Integration entwickelt werden. Die Möglichkeiten der Formgebung sind durch zahlreiche, an das Produkt anpassbare Fertigungsverfahren sehr groß, und auch hochbelastbare Bauteile mit kleinen Wandstärken und komplizierten Formen, wie Hinterschneidungen, können in einem Stück gefertigt werden. Diese Möglichkeiten müssen daher schon bei der Entwicklung von Produkten in Betracht gezogen werden. Auch die gute Resistenz gegen Umwelteinflüsse, wie Salzwasser, Säuren und Temperaturschwankungen, erweitern den Einsatzbereich von FVK. Bei der Einbettung von FVK in ein PLM-System müssen Instanzen geschaffen werden, die es ermöglichen, die zeitaufwändigere Konstruktion mit den Punkten:

- Evaluierung von Materialeigenschaften durch Experimente
- Erstellung von Layoutplänen, Faserorientierungen, Längen, Arten
- Definition aller Herstellungsprozessparameter

in den Zeitplan einzuarbeiten und die entstehenden Daten, wie anisotrope Materialeigenschaften, Laminatpläne, Ergebnisse von Ermüdungs- und Alterungsversuchen in das Datenmanagementsystem einfließen zu lassen. Hier muss gewährleistet werden, dass in der Produktion die notwendigen Informationen zum Herstellungsprozess (nicht nur werkstoffverarbeitend, sondern auch werkstofferzeugend), wie Pressdrücke, Aushärttemperaturen, Abkühlzeiten, etc. verfügbar sind. Für die Produktnutzungsphase müssen Servicepläne mit Berücksichtigung von Versagenskriterien und werkstoffspezifische Reparaturanleitungen erstellt werden. Letztendlich muss sich der Konstrukteur schon in der Entwicklung Gedanken über die Entsorgung des Produktes machen.

Im Beispiel der Motorhaube wird die klassische Blechkonstruktionen aus einem tiefgezogenem Außenblech, mehreren Profilen, aufgeschweißten Kanten und genieteten Scharnieren durch ein Integralbauteil aus CFK (Kohlefaserverstärktem Kunststoff) mit Epoxidharzmatrix ersetzt. Die Motorhaube wird als Sandwich gefertigt, damit eine Geräuschdämmung in die Struktur integriert werden kann. Die Entwicklungsabteilung hat die Geometrie und den Laminatplan erarbeitet. Die Werkstoffkomponenten, wie Fasern, Harz und Schaumkern, sind gewählt. Das Bauteil soll im RTM-Verfahren hergestellt werden. Dazu wird eine Form konstruiert, der Zuschnittplan für die Faserhalbzeuge erstellt, sämtliche Prozessparameter definiert und ein Prototyp im Schwingungslabor getestet.

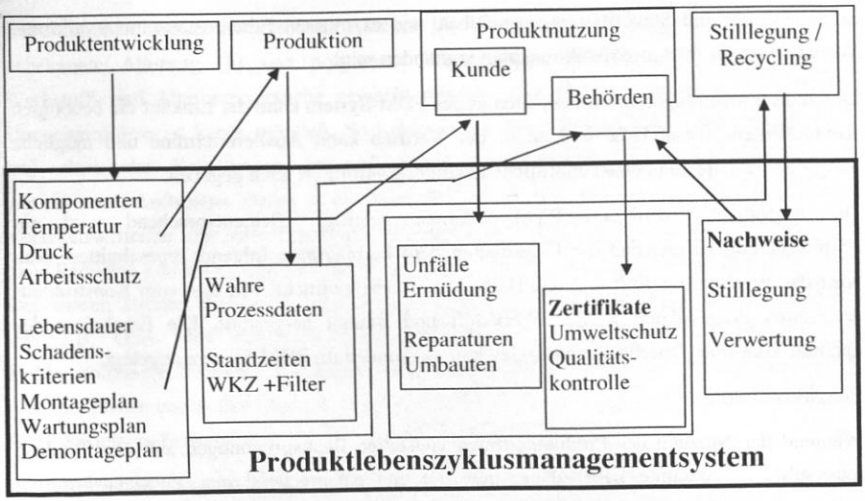


Abb.1: ausgewählte Datenflüsse im PLM-System

All diese Daten werden nun im PDM-System hinterlegt und der Produktion freigegeben. Sie bilden auch die Grundlage für etwaige Sicherheits- und Qualitätszertifikate (TÜV, ISO9000). Zusätzlich werden Lebensdauer, Wartungs- und Schadenskriterien erarbeitet. Dies kann z.B. die Anweisung des Bauteilaustausches nach einem Frontalzusammenstoß sein. Des Weiteren wird ein Demontage- und Entsorgungsplan erstellt.

Produktion

Durch eine Vielzahl von möglichen, oft teuren Werkstoffkomponenten, bieten sich zahlreiche, aus der metallverarbeitenden und der Textilindustrie abgeleitete Verarbeitungsverfahren an. Bedingt durch mindestens zwei Komponenten, die in einer chemischen Reaktion den Werkstoff ergeben, ist die Herstellung entsprechend aufwändig. Dazu kommen komplizierte Werkzeuge und Formen, welche für eine möglichst hohe Integralbauweise nötig sind. Sämtliche Prozessinformationen müssen im Datensystem vom Konstrukteur bereitgestellt werden und von der Fertigung abgerufen werden können. Zur Qualitätskontrolle müssen die wahren Prozesswerte im Zusammenhang im PDM-System abgebildet werden. Hierbei sind die Komponenten, Mischungsverhältnisse, Verarbeitungstemperaturen, Luftfeuchtigkeit, Aushärtzeiten, Verarbeitungsdrücke, etc. entscheidend für die strukturelle und optische Bauteilqualität.

Eine weitere Herausforderung stellt der Arbeitsschutz dar. Die bei der FVK-Herstellung verwendeten Reaktionsharze sind chemisch reaktiv und dies beeinträchtigt die Gesundheit. Daher sind Werkstoffmerkblätter unbedingt im Datenmanagementsystem bereit zu stellen, aktuell zu halten und in der Produktion zu beachten. Bei der Nachbearbeitung (Sägen,

Schleifen, ...) sind Staubfilter unvermeidbar, und es müssen Filteraustauschintervalle und Werkzeugstandzeiten im Produktionsplan vorhanden sein.

Durch die Einbettung aller Prozessdaten in das PDM-System kann der Einkauf die benötigten Komponenten Just-in-Time einkaufen, der Vertrieb kann Auslieferertermine und mögliche Losgrößen ableiten und eine behördliche Qualitätskontrolle ist auch gegeben.

Die Motorhaube wird im RTM-Verfahren gefertigt. Dementsprechend wird ein Formwerkzeug gefräst und die Fasermatten dem Laminatplan folgend zugeschnitten. Nun wird das Werkzeug gefüllt und das Harz in die Form gedrückt. Mit den vom Konstrukteur definierten Prozessdaten werden Werkstoff und Bauteil hergestellt. Die Ergebnisse der Qualitätskontrolle (Oberflächengüte, Gewicht, ...) werden im PDM-System abgelegt.

Produktnutzung

Während der Nutzung des Produktes treten vielseitige Beanspruchungen auf. Das Produkt muss über die gesamte Lebensdauer gewartet und entsprechend den Versagenskriterien untersucht werden. Im Falle von FVK kann Sensorik in den Werkstoff eingebracht werden, denn eine Sichtkontrolle erfasst nur Makroschäden und zerstörungsfreie Bauteiluntersuchungen bei FVK sind sehr aufwändig. Dem Kunden und Serviceunternehmen müssen daher genaue Schadenskriterien definiert werden, die eine Reparatur oder Austausch des Bauteils zur Folge haben. Dies können z.B. Matrixverfärbungen und große Fehler, wie Delaminationen, sein. Irreversible Alterung tritt bei allen polymeren Werkstoffen auf und diese intra- und intermolekularen Änderungen erzeugen makroskopische Werkstoffeigenschaftsänderungen und müssen sich in Wartungsplänen niederschlagen [3]. Die Einbettung ins PLM erfolgt durch Servicepläne, genaue Schadensprotokollierung, Reparaturprotokollierung und -anleitungen. Diese Daten sind für potentielle Zweitnutzer und Entsorger enorm wichtig, da Reparaturen an FVK im Gegensatz zu Metallen mit verschiedensten Materialien und Verfahren erfolgen können und damit sehr unterschiedliche Qualitäten entstehen.

Die Motorhaube wird größtenteils hochfrequent dynamisch belastet, doch auch Spitzen durch Zuknallen, Draufsetzen und Zusammenstösse treten auf. Durch die Integralbauweise sind natürlich die Verbindungen zu den Scharnieren und Steifen gefährdet und zu kontrollieren. Eine genaue Wartung der Oberflächenbeschichtung (Lack) verhindert eine polymertypische Alterung und damit eine strukturelle Schwächung der Haube.

Produktstilllegung – Entsorgung

Durch Unfälle, intensive Nutzung oder Erreichen der maximalen Lebensdauer kommt auch ein Bauteil aus FVK in die Phase der Stilllegung und Entsorgung. Im Vergleich zu Metallen sind FVK kaum demontier- und recycelbar. Dies liegt zum einen an der Integralbauweise, an den meist adhäsiven Verbindungen und der verbreiteten Anwendung von Misch-

konstruktionen wie Sandwich oder Alucore [6]. Ein weiterer Nachteil ist die teilweise unbekannte Alterung [5] von polymeren Werkstoffen. Zwar können mit Prototypen Werkstoff- und Alterungsversuche gemacht werden, aber das Simulieren aller möglichen Umwelteinflüsse ist kaum möglich. So haben Hitze, Feuchtigkeit, UV-Licht, mechanische und chemische Belastungen unterschiedliche Auswirkungen in Abhängigkeit ihres gemeinsamen Auftretens. Daher ist die Wahl des richtigen Zeitpunktes der Stilllegung durch Versagenskriterien sehr schwierig (siehe Produktnutzung). Aktuelle Ansätze zum Entsorgen, bzw. Recyclen von FVK, sind z.B. das Verbrennen, das Granulieren (Thermoplaste) oder das Deponieren. Hierbei sind klare Unterschiede zwischen duro- und thermoplastischen Matrices und z.B. Glas- und Kohlenstoffasern zu machen. So verbrennen Duroplaste und Kohlenstofffasern, Thermoplaste dagegen sind schmelzbar. Die entsprechende Entsorgung ist daher zu planen und Anleitungen, Komponenten, chemische Bestandteile, etc. sind explizit im PLM-System zu benennen.

Im Falle der Motorhaube als CFK Sandwich mit Epoxid Matrix kann ein Wiederverwenden kaum erreicht werden. Eine Restenergieverwertung durch Verbrennung ist möglich, wenn es alle chemischen Bestandteile zulassen. Ist eine umweltverträgliche Verbrennung nicht möglich, es wurden z.B. Reparaturen mit giftigen Harzen durchgeführt und im PLM-System vermerkt, dann bleibt nur ein Schreddern und Deponieren übrig. Diese im Vergleich zum einschmelzbaren Metall sehr ineffektive Entsorgung ist ein klarer Nachteil von FVK.

5 Zusammenfassung

Beim Einsatz von FVK muss das Produkt für diesen Werkstofftyp geeignet sein, d.h. die positiven Eigenschaften des Komposites, wie hohe spezifische Steifig- und Festigkeit, geringe Wärmedehnung, etc. müssen eine Metallsubstitution trotz der höheren Kosten, der aufwändigeren Konstruktion und vor allem die schwierige Gewährleistung der Sicherheit und Funktion über die gesamte Lebensdauer rechtfertigen.

Aus Sicht des PLM müssen bei der Verwendung von FVK im Vergleich zum Konstruieren mit Metallen besondere Maßnahmen eingeleitet werden. Hierzu sind nicht nur die stärkere Gewichtung der Produktplanung und Dokumentation und der Fertigungsprozesskontrolle zu zählen, sondern auch die Erfüllung von Arbeitsschutzauflagen, das Erstellen von Versagenskriterien und das Planen der meist schwierigen Entsorgung. Zum einen bietet FVK die besondere Chance, das eingesetzte Material optimal zu nutzen, zum anderen setzt ihr Einsatz eine komplexe Herstellungstechnologie voraus und die Entsorgung ist oft vergleichsweise teuer.

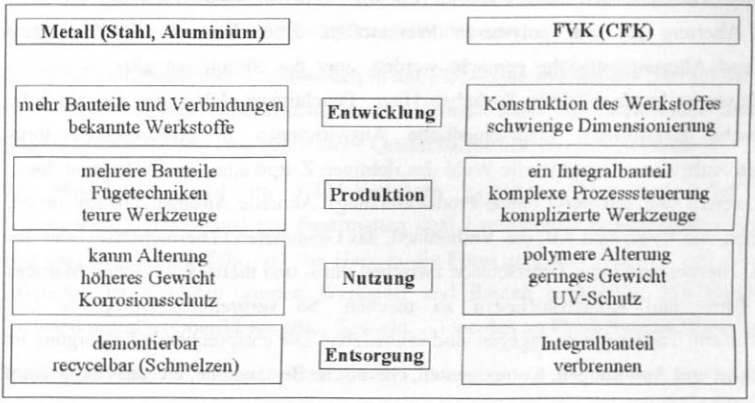


Abb. 2: Unterschiede Metall und FVK in Bezug auf die Produktlebensphasen

Am Beispiel der Motorhaube aus CFK ist zu sehen, dass das geringere Gewicht, die Korrosionsfestigkeit und die Integralbauweise durch Nachteile bei der Entwicklung, der Produktion und der Recyclefähigkeit erkauft werden. Wenn die Motorhaube in großen Stückzahlen hergestellt werden soll, wirken sich die langen Fertigungszyklen, teuren Komponenten und die schwer verkaufbare nicht ökologisch Entsorgung zusätzlich negativ aus. Damit ist hier in Bezug auf alle Produktlebensphasen eine Metallsubstitution nur in Ausnahmefällen sinnvoll.

Literatur

[1] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices Berlin: Springer Verlag, 1995

[2] www.R-G.de: Handbuch Faserverbundwerkstoffe GmbH

[3] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999

[4] Hartmann, A.: Lebenszyklusberechnung als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde, Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2000

[5] Kienert, M.: Rechnerische Lebensdauervorhersage für mehrschichtige Faser-Kunststoff-Verbunde, Neunkirchen, 2000

[6] Knauer, B.; Wende, A.: Konstruktionstechnik und Leichtbau, Berlin: Akademie-Verlag 1988

[7] Scharr, G.; Pospischil, L.: Verbundwerkstoffe - Werkstoffe im Flugzeugbau, auch Werkstoffe der Zukunft für schnelle Schiffe, Schiffbauforschung (2/2002)

Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Konstruktionstechnik, Maschinenbauinformatik
Ruhr Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum
Tel.: +49(0)234/32-27009

Dipl.-Ing. Stanley Baksi
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion/ Konstruktionstechnik
Postfach 4120
39106 Magdeburg
E-Mail: stanley.baksi@masch-bau.uni-magdeburg.de

Dr. Christiane Beyer
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart
Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
binz@imk.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Sven Brockop
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
Tel.: 0351/46333775
Fax.:0351/46337050
E-mail: brockop@mb.uni-magdeburg.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Brökel
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2
18055 Rostock
E-mail: klaus.broekel@mbst.uni-rostock.de

Prof. Dr. med. habil. Dr. med. dent. U. Eckelt
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
TU Dresden
Fetscherstraße 74
01309 Dresden
Tel.:0351/4583382
Fax.:0351/4585348

Dr. Frank Engelmann
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion/Konstruktionstechnik
Postfach 4120
39106 Magdeburg
E-Mail: frank.engelmann@masch-bau.uni-agdeburg.de

Prof. Dr. Jörg Feldhusen
Rheinisch-Westfälische
Technische Hochschule Aachen
Lehrstuhl und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen

Dipl.-Wirt.-Ing. Ursula Frank
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
ursula.frank@hni.upb.de

Ing. Mathias Funke
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
TU Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
E-Mail: juergen.gausemeier@hni.upb.de

Dipl.-Ing. Boris Gebhardt
Rheinisch-Westfälische
Technische Hochschule Aachen
Lehrstuhl und Institut für allgemeine
Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen
E-mail: gebhardt@ikt.rwth-aachen.de

Dr. Michael Gelinsky
Technische Universität Dresden
Institut für Werkstoffwissenschaft
Max-Bergmann-Zentrum für Biomaterialien
Budapester-Str. 27
01069 Dresden
E-Mail: gelinsky@tmfs.mpgfk.tu-dresden

Prof. Dr.-Ing. Piotr Gendarz
Lehrstuhl für Automatisierung und Integrierte
Fertigungssysteme
Schlesische Technische Universität
ul. Konarskiego 18a
PL 44-100 Gliwice
tel. +48 32 37 12 78
Fax. +48 32 37 16 24
E-mail: gendarz@polsl.gliwice.pl

Dipl.-Ing. Jana Hadler
Universität Rostock
Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Str. 2
18059 Rostock

Dr. Haygazun Hayka,
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik
Pascalstrasse 8 – 9
10587 Berlin
Tel.: 390 06-0

Dipl.-Ing. André Hilliger
KEK GmbH
Bad Schmiedeberg
E-mail: hilliger@kek-gmbh.com

Dipl.-Ing. Heinz-Simon Keil
SIEMENS, Corporate Technology Production
Process Virtual Engineering
Otto-Hahn-Ring 6
81730 München
Tel. 49(0)89-636- 55505
E-mail: heinz-simon.keil@siemens.com

Dipl.-Ing. Hendrik Klein
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2
18055 Rostock
E-mail: hendrik.klein@mbst.uni-rostock.de

Dr.-Ing. Andreas Koßler
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
TU Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
Tel.: 0351/46333775
Fax.:0351/46337050
E-Mail:andreas.kossler@mailbox.tu-dresden.de

Dipl-.Ing. Ayhan Kurtuldu
Keiper GmbH & Co. KG
Kaiserslautern
E-mail: ayhan.kurtuldu@keiper.com

Dipl.-Ing. Nils Macke
Rheinisch-Westfälische
Technische Hochschule Aachen
Lehrstuhl und Institut für allgemeine
Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen

Dipl.-Ing. Erwin-Zahari Nurcahya
Rheinisch-Westfälische
Technische Hochschule Aachen
Lehrstuhl und Institut für allgemeine
Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen

Prof. Dr. Wolfgang Pompe
E-Mail: pompe@tmfs.mpgfk.tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Werkstoffwissenschaft
Max-Bergmann-Zentrum für Biomaterialien
Budapester-Str. 27
01069 Dresden

Dipl.-Ing. Reinhard Rahn
Universität Rostock
Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Str. 2
18059 Rostock

Dr.-Ing. Heinz Rybak
MDTVISION
Schatzbogen 60
81829 München
E-mail: h-rybak.mdtvision@de.ibm.com

Dipl.-Ing. Bernhard Saske
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
TU Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
Tel.: 0351/46333775
Fax.:0351/46337050

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau
Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2
18055 Rostock
E-mail: gerhard.scharr@mbst.uni-rostock.de

Prof. Dr. sc. i.R. Dietrich Schlottmann
Lewarkweg 10
18146 Rostock

Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Schmidt
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
E- mail: andreas.schmidt @hni.upb.de

Prof. Dr.-Ing. Henrik Schnegas
Hochschule Wismar
University of Technology, Business and Design
FB Maschinenbau/Verfahrens- und
Umwelttechnik, FG Konstruktionstechnik
Philipp – Müller – Str. Haus 20
PF 1210
23952 Wismar
Tel.: (03841) 753551
E-mail: h.schnegas@mb.hs-wismar.de

Dr. med. Matthias Schneider
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und
Gesichtschirurgie
TU Dresden
Fetscherstraße 74
01309 Dresden
Tel.:0351/4583382
E-Mail: mkg@rcs.urz.tu-dresden.de

Dr.-Ing. Christine Schöne
Technische Universität Dresden
Institut für Produktionstechnik
01062 Dresden
E-Mail: schoene@mciron.mw.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Steffen Schreiber
Technische Universität Dresden
Institut für Produktionstechnik
01062 Dresden
E-mail: schreibers@mciron.mw.tu-dresden.de

Guido Schulte
Aker MTW Werft GmbH
Wendorfer Weg 5
23966 Wismar
Tel.: +49 (0) 3841 770
Fax: +49 (0) 3841 76 36 24
www.akerostsee.de

Dipl.-Ing. Ramona Schwarz
Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg Institut für
Maschinenkonstruktion/Konstruktionstechnik
Postfach 4120
39106 Magdeburg
E-Mail: ramona.schwarz@masch-bau.uni-magdeburg.de

Doz. Dr.-Ing. Peter Sigalov
Universität „Angel Kantschev"
Fakultät Business und Management
Lehrstuhl für Informatik und
Informationstechnologien
Str. Studentska 8
7017 Russe / Bulgarien
E-Mail: psigalov@europe.com

Dr.-Ing. Wolfgang Steger
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
TU Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
Tel.: 0351/46333775
Fax.:0351/46337050
E-mail: wolfgang.steger@mailbox.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Alexander Stekolshchik
Fakultät für Maschinenbau, Institut für
Konstruktionstechnik, Maschinenbauinformatik
Ruhr Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum
E-mail: astek@itm.ruhr-uni-bochum.de
Tel.: +49(0)234/32-27004

Prof. Dr.-Ing. habil Ralph Stelzer
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
TU Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
Tel.: 0351/46333775
Fax.:0351/46337050
E-mail: ralph.stelzer@mailbox.tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Stolp
Fachhochschule Südwestfalen
Lindenstr. 53
59872 Meschede
E-mail: stolp@fh-swf.de

Dipl.-Math. Henner Vöcking
Mechatronik Laboratorium Paderborn
Pohlweg 98
33098 Paderborn
E-Mail: Henner.Voecking@MLaP.de

Dr. Uwe von Lukas
Zentrum für Grafische Datenverarbeitung e.V.
Joachim-Jungius-Str. 11
18059 Rostock
E-mail: uwe.von.lukas@rostock.zgdv.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Robert Watty
Universität Stuttgart
Institut für Maschinenkonstruktion und
Getriebebau
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
E-mail: watty@imk.uni-stuttgart.de