

EINE BETRACHTUNG ZUR GANZEHEITLICHEN ABSCHÄTZUNG DES PRODUKTREIFEGRADES AUF BASIS DES VERHALTENS

Hartmut Krehmer, Kristin Paetzold

Zusammenfassung

Um im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses zu jedem Zeitpunkt zielgerichtet notwendige Aktivitäten und Maßnahmen einleiten zu können, ist es erforderlich, den tatsächlich vorliegenden Reifegrad des Produktes zuverlässig zu kennen. Um diesen nicht ausschließlich geometrieorientiert, sondern auf Basis des tatsächlich Produktverhaltens zu ermitteln, ist eine Beschreibung des Produktverhaltens notwendig, welche auf den Informationen basieren muss, die bereits in der Entwicklung abgesichert werden können. Über die kundenrelevanten Anforderungen hinaus sind während der Entwicklung weitere Eigenschaften zu beachten, die beispielsweise aus den verschiedenen Lebensphasen eines Produktes resultieren. Als solche Zielgrößen sind z.B. Fertigungs-, Montage- und Transportgerechtigkeit zu nennen. Bei der Absicherung des Produktreifegrades ist somit eine Vielzahl an Aspekten zu beachten, deren Aussagefähigkeit und Relevanz über den Prozessverlauf hin variieren kann. Darüber hinaus ergeben sich vielfältige Anforderungen, die an eine ganzheitliche Absicherung des Produktreifegrades zu stellen sind. Zu nennen wären hier unter anderem Anforderungen an die zu wählenden Indikatoren, die Trennung von Produktreifegrad und Prozessfortschritt sowie die Modellierung des Produktverhaltens. In diesem Beitrag werden daher die Herausforderungen, die bei Erarbeitung einer verhaltensbasierten Absicherung zu beachten sind, aufgezeigt, diskutiert und mögliche Lösungswege aufgezeigt. Ziel dieses Beitrages ist es, einen Überblick über den Stand der Reifegradbetrachtungen zu geben und daraus weitere Notwendigkeiten zu seiner Beschreibung abzuleiten.

1 Einleitung

Für den Kunden stellt sich letztendlich neben der technischen Umsetzung der einzelnen Funktionen, auch das daraus resultierende Gesamtverhalten des Produktes im späteren Gebrauch als relevant dar. Daher wird er nur bereit sein, für das Produkt zu bezahlen, wenn sich die Summe der realisierten Produkteigenschaften hinreichend genau mit seinen Anforderungen deckt. Damit die Einführung eines neu entwickelten Produktes erfolgreich sein kann, müssen daher bei der Abschätzung seines Reifegrades dieselben Bewertungsmaßstäbe wie die des späteren Kunden angesetzt werden. Daher ist es äußerst wichtig, bereits während der Produktentwicklung durchgängig die Sicht des Kunden in den Fokus zu stellen. Für die Absicherung des Produktreifegrades sind zusätzlich zu den Eigenschaften, die aus den Kundenanforderungen resultieren, auch weitere, entwicklungsinterne Eigenschaften zu berücksichtigen. Diese Produktreifegradkenngrößen haben in verschiedenen Prozessphasen unterschiedliche Aussagekraft, d.h. die Relevanz dieser Eigenschaften (Indikatoren) verändert sich über den Prozessfortschritt: Eine Bewertung hinsichtlich der Fertigungseigenschaften kann erst bei einer relativ hohen Detaillierung des Produktes zuverlässig vorgenommen werden, während hingegen die Absicherung des Gesamtkonzeptes hinsichtlich der prinzipiellen Umsetzbarkeit vor allem in einer sehr frühen Prozessphase zu beachten ist. Aus den aufgezeigten Fragestellungen resultieren Herausforderungen an eine ganzheitliche, verhaltensbasierte Produktabsicherung, welche im Folgenden samt möglicher Lösungsansätze aufgezeigt werden.

2 Inhalte einer Absicherung: Funktion, Eigenschaften, Merkmale und Verhalten – Versuch einer Begriffsklärung

Um ein Produkt auf Basis seines Verhaltens beurteilen zu können, muss zuerst eine geeignete Möglichkeit gefunden werden, dieses zu beschreiben. Um hier eine keine Verwirrung entstehen zu lassen, ist es notwendig, zu Beginn die Begrifflichkeiten „Funktion“, „Merkmale“, „Eigenschaften“ und „Verhalten“ zu definieren und von einander abzugrenzen.

Unter der *Funktion* wird im Rahmen dieses Beitrages seine Aufgabe, sein Sinn, sein Zweck verstanden [1], [2]. Wenn sie nicht erfüllt ist, ist das System insgesamt nutzlos. Die Funktion beantwortet die Frage danach, wofür das System geschaffen wurde, bzw. welche Wirkung durch das System erreicht wird [3]. Die Funktion eines technischen Systems stellt den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems dar. In diesem Verständnis ist die Funktionsformulierung an sich somit eine abstrakte und lösungsneutrale Beschreibung. Unter *Merkmalen* werden analog zu [4] diejenigen Stellschrauben verstanden, mit denen der Entwickler das Produkt festlegen und direkt beeinflussen kann. Die Merkmale definieren somit das Produkt, sind also Angaben über Struktur, Material, Gestalt oder Beschaffenheit. Die Merkmale lassen sich analog zu [5] somit in die Gruppen „physio-chemical form“ (Werkstoff) und „geometrical form“ (Geometrie & Struktur) einteilen. *Eigenschaften* werden ebenfalls analog zu [4] verstanden: Die Eigenschaften eines Produktes können nicht direkt vom Entwickler festgelegt werden, sondern ergeben sich aus den Merkmalen. Hierzu gehören direkt messbare und quantifizierbare Eigenschaften wie Gewicht, Steifigkeit und Kosten ebenso wie lediglich qualitativ bewertbare Eigenschaften wie Sicherheit, Herstellbarkeit, Umweltfreundlichkeit und ästhetische Gesichtspunkte. Analog zu [5] lassen sich auch die Eigenschaften in zwei Klassen einteilen, die „intensive properties“ und die „extensive properties“. „Intensive properties“ sind die spezifischen Eigenschaften wie z. B. Dichte, spezifisches Gewicht oder spezifische Festigkeit und werden durch die „physio-chemical form“, also die Werkstoffwahl festgelegt. Aus diesen „intensive properties“ ergeben sich erst zusammen mit Festlegung der „geometrical form“ die sogenannten „extensive properties“: Beispielsweise durch die Festlegung des Materials „Stahl“ wird die „intensive property“ *Dichte* = $7,85 \text{ g/cm}^3$ festgelegt. Erst über die Festlegung der „geometrical form“ des Bauteils ergibt sich dann über das Bauteilvolumen zusammen mit der „intensive property“ *Dichte* die „extensive property“ *Bauteilgewicht*. Über diesen Zusammenhang lässt sich das Eigenschaftsprofil eines Produktes auf Basis seiner Merkmale analysieren. Unter dem *Verhalten* eines technischen Systems wird in diesem Beitrag verstanden, wie dieses System mit seiner Umwelt interagiert, also was das System macht bzw. machen muss, um seinen Zweck (= Funktion) zu erfüllen. Somit ist das Verhalten letztlich eine Spezifizierung der Funktion: Aus dem Verhalten eines Systems geht somit nicht nur hervor, was seine Aufgabe ist, sondern zugleich auch wie es diese Aufgabe erfüllt. Daher ist die Verhaltensbeschreibung im Gegensatz zur Funktionsbeschreibung nicht lösungsneutral. Bei der Betrachtung des Verhaltens ist daher auch weder die Art der Realisierung der Aufgabe, noch sind die einzelnen Systemkomponenten relevant, sondern das System wird als Ganzes gesehen und nur dessen Einwirken auf die Umgebung betrachtet.

Da die Randbedingungen des späteren Produkteinsatzes einen erheblichen Einfluss auf das Produkt und sein Verhalten haben, müssen sie während der Produktentwicklung zweifelsohne berücksichtigt werden. Somit kann das Verhalten eines Produktes als die Folge des realisierten Eigenschaftsprofils unter dem Einfluss der so genannten Nutzungs- und Umgebungsbedingungen beschrieben werden. Unter der Verwendung der oben erklärten Begrifflichkeiten wird damit deutlich, dass ein Produkt ein solches Eigenschaftsprofil besitzen muss, welches unter den gegebenen Nutzungs- und Randbedingungen ein Verhalten zeigt, mit dem die geforderte Funktion hinreichend erfüllt werden kann. Den Weg ausgehend von den Merkmalsklassen „physio chemical form“ und „geometrical form“ über die Eigenschaften hin zur Beschreibung des Produktverhaltens zeigt Bild 1.

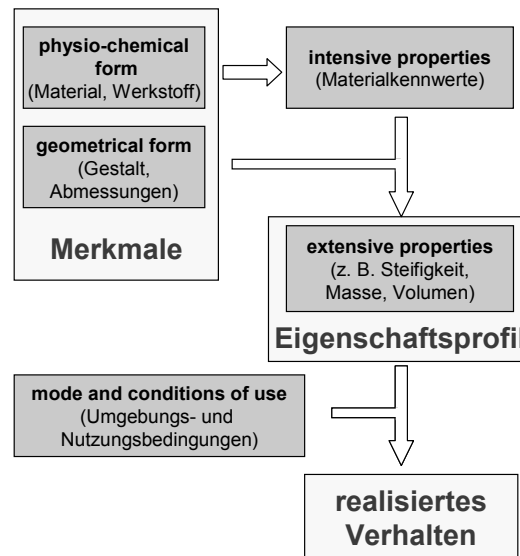


Bild 1: Beschreibung des Produktverhaltens auf Basis seiner Eigenschaften und Merkmale

3 Prozessfortschritt und Produktreifegrad

Diese Begriffe werden heute häufig synonym verwendet, bzw. es wird mit einem bestimmten Prozessfortschritt auch ein bestimmter Produktreifegrad gleichgesetzt. Da aber das Produkt mit anderen Kriterien als der Prozessverlauf gemessen werden muss, ist für eine zuverlässige Produktabsicherung die klare Trennung der beiden Begriffe „Prozessfortschritt“ und „Produktreifegrad“ unumgänglich. Dennoch muss in eine umfassende Betrachtung eines Entwicklungsprojektes sowohl der Prozessfortschritt als auch der Produktreifegrad mit einbezogen werden. Sowohl die Abschätzung des Prozessfortschritts als auch die des Produktreifegrades geschieht anhand von Indikatoren, welche es ermöglichen, Prognosewerte und Trendverläufe zu ermitteln, Risiken frühzeitig zu erkennen und den aktuellen Stand transparent aufzuzeigen. Indikatoren können beispielsweise erfüllte Meilensteine, gelöste Problemunkte, die Anzahl der Freigaben, benötigte Ressourcen, verbrauchte Zeit oder verursachte Kosten sein. An Indikatoren sind für eine zuverlässige Absicherung bestimmte Anforderungen zu stellen. Hierzu gehören beispielsweise ihre klare Definition, Beständigkeit, sichere Quantifizierbarkeit, einfache Messbarkeit, mögliche Gewichtung, Vergleichbarkeit, leichte Auswertung sowie Unabhängigkeit von anderen Indikatoren. Durch die Auswahl solcher Indikatoren anhand fester Kriterien kann eine objektive Aussage erreicht und Willkür ausgeschlossen werden. Einen wichtigen Punkt stellt der Umgang mit übererfüllten Indikatoren dar: Kann die Arbeit früher als erwartet abgeschlossen werden, oder der Soll-Wert übertroffen (Bsp.: Gewichtsvorgabe unterboten), resultiert für den zugeordneten Indikator mit einem Erfüllungsgrad von über 100% eine *Über-Erfüllung*. Um die Kompensation eines weniger erfüllten Indikators durch diesen übererfüllten zu vermeiden, muss dieser in einem solchen Fall auf 100% zurückgesetzt werden. Aus den Indikatoren wird anschließend ein vergleichender Kennwert aus Ist- und Soll-Wert gebildet [6]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei falscher Indikatorwahl unter Umständen die gewünschte Objektivität nicht gegeben ist.

$$\text{Kennwert } K = \frac{\text{Ist-Wert}}{\text{Soll-Wert}} \quad (1)$$

Aus den Erfüllungsgraden der einzelnen Indikatoren kann unter Berücksichtigung der jeweiligen Gewichtungen G nach folgender Formel ein Gesamt-Kennwert gebildet werden [6]: Durch Gewichtung kann der Einfluss einzelner Faktoren je nach Bedarf ausgeblendet, geschwächt oder sogar verstärkt werden:

$$\text{Gesamt – Kennwert } K_{ges} = \frac{\sum_{i=0}^n (\text{Kennwert } K_i \cdot \text{Gewichtung } G_i)}{\sum_{i=0}^n \text{Gewichtung } G_i} \quad (2)$$

3.1 Prozessfortschritt

Ziel der Erfassung des Prozessfortschrittes ist es, objektive Statusaussagen zu einem Entwicklungsprojekt treffen und die Faktoren *Zeit* und *Kosten* überwachen zu können [7]. Durch die Erfassung des Prozessfortschrittes bietet sich bei unbefriedigendem Verlauf die Möglichkeit, Warnmeldungen auszugeben und negative Trends frühzeitig zu stoppen. Da jedoch im Rahmen einer Entwicklung meist viele Beteiligte an vielen Unterprozessen arbeiten, können diese – wenn überhaupt – jeweils nur ihren Umfang bewerten, wodurch eine globale Aussage zum Prozessverlauf sehr schwer fällt. Eine effiziente Termin- und Kostenüberwachung setzt aber die Kenntnis über den aktuellen Prozessfortschritt und die aktuelle Zielerreichung voraus [8]. Dem Erfassungsaufwand des Prozessfortschrittes stehen auf der Nutzenseite die Möglichkeit der frühzeitigen Kompensation sowie die hohe Gesamtprojekttransparenz gegenüber. Zwei Möglichkeiten zur Erfassung des Prozessfortschrittes stellen beispielsweise die Fortschrittsabschätzung auf Basis des sogenannten Fertigstellungsgrades und die so genannte Problempunktebilanz dar [6]. Bei der Prozess-Überwachung anhand des Fertigstellungsgrades wird der Fortschritt des Projektes analog Formel (1) über Vergleich der abgearbeiteten Entwicklungsarbeiten mit der Gesamtanzahl quantifiziert. Für die Ermittlung des Prozessfortschrittes typischerweise herangezogene Entwicklungsarbeiten sind dabei z.B. Meilensteine, Quality-Gates, Abstimmungspunkte, Teil-Projekte, Arbeitspakete und freigegebene Dokumente oder Bauteile, denen zu Beginn ein Fertigstellungstermin zugeordnet wird [6]. Bei der Prozessüberwachung mit Hilfe der Problempunktebilanz hingegen werden alle auftretenden Problempunkte festgehalten und ihre Lösung zu einem festen Termin gefordert [8]. Aus dem Vergleich der abgearbeiteten Problempunkte mit der Gesamtanzahl kann eine Aussage zum Prozessfortschritt abgeleitet werden. Hierbei wird nicht nur die aktuelle Problemlösung erfasst, sondern auch eine Prognose möglich: Anhand festgesetzter Termine für die Lösung jedes Problempunktes kann eine Aussage über die innerhalb eines bestimmten Zeitraumes erwartete Menge gelöster Problemen getroffen werden. Da im Projektverlauf immer wieder neue Problempunkte entstehen, ist der (steigende) End-Wert der abzuarbeitenden Problempunkte unbekannt. Bild 2 zeigt mögliche Verläufe für die Erfassung des Prozessfortschrittes auf Basis des Fertigstellungsgrades und der Problempunktebilanz.

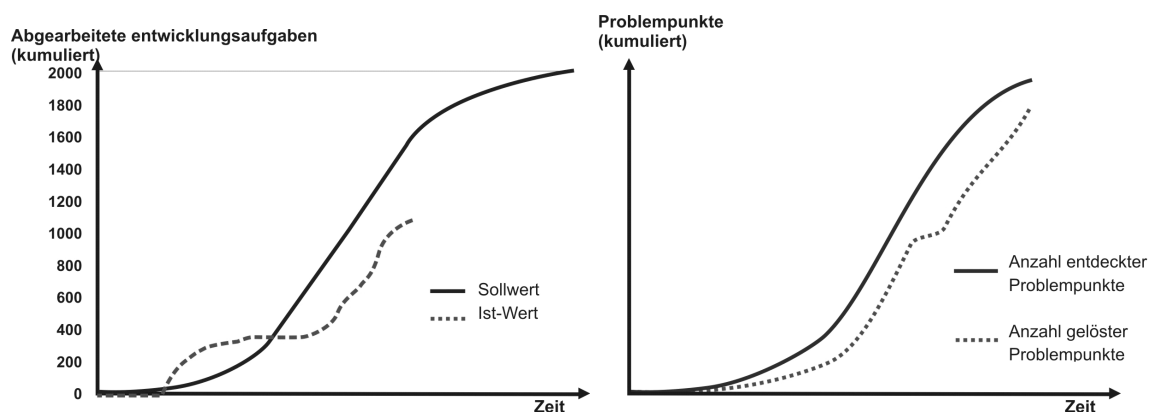


Bild 2: Abgearbeitete Entwicklungsaufgaben (li.), Problempunktebilanz (re.) (nach [6])

3.2 Produktreifegrad

Wichtig an der Absicherung ist es, zu verstehen, dass aus einer Erfassung des Prozessfortschritts anhand einer Termin- und Kostenüberwachung keinerlei Aussage zum Produkt selbst abgeleitet werden kann. Um die Qualität des Produktes schon während der Entwicklung sicherzustellen, ist daher der Produktreifegrad gesondert zu überwachen und abzusichern. Unter *Produktreifegrad* wird die „Einschätzung der verwendungsbezogenen Güte eines Produktes“ mit dem Ziel der objektiven „Bewertung der Güte eines Entwicklungsstandes“ verstanden [7]. Reifegrad ist somit der zu einem beliebigen Zeitpunkt erfasste Zustand eines Produktes hinsichtlich definierter Indikatoren [6]. Ein Verständnis des Produktreifegrades wie beschrieben zeigt folgende Definition: Reifegrad ist der „Grad der Erfüllung der Anforderungen durch den Kunden (Kundensicht) unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationen, die sich durch die Wahl der Lösung ergeben (Ingenieursicht)“ [2]. Der Reifegrad eines Produktes verläuft aufgrund von Iterationen, geänderten Zielwerten, auftretenden Problemen und über den Prozessverlauf wechselnde Indikatoren nicht linear, sondern schwankt: Durch Absicherung zu bestimmten Fixpunkten ergibt sich jedes Mal eine Momentaufnahme, die einen bestimmten Verlauf suggeriert. Dadurch kann es zu einem angenommenen Reifegradverlauf kommen, der mit dem realen wenig übereinstimmt (Bild 3).

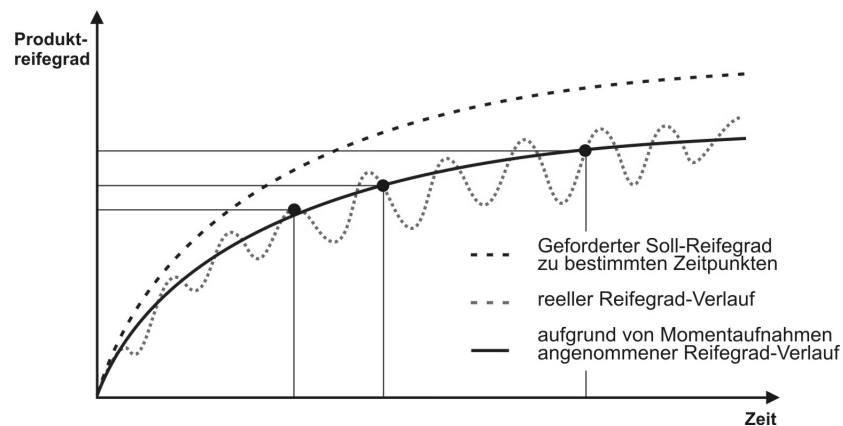


Bild 3: Geforderter, realer und angenommener Produktreifegrad-Verlauf (nach [7])

Wegen der zu festgelegten Zeitpunkten durchgeführten Absicherung kann es bei unglücklicher Lage der Absicherungspunkte und bei starken Schwankungen des Reifegrades dazu kommen, dass ein Reifegradverlauf angenommen wird, der mit dem realen Verlauf wenig übereinstimmt. Ein solcher Fall ist Bild 4 dargestellt: Auf Grund der Momentaufnahmen wird auf eine völlig normale und wie geplant ablaufende Reifegradentwicklung geschlossen, obwohl die tatsächliche Entwicklung alles andere als Erfolg versprechend verläuft. In diesem Fall wird fälschlicherweise ein notwendiger Eingriff nicht stattfinden. Ebenso könnte es vorkommen, dass der Reifegradverlauf auf Grund der Momentaufnahmen als kritisch eingestuft wird, obwohl der reale Verlauf voll und ganz im Zeitplan liegt. Diese Beispiele zeigen, dass zu den im Rahmen der Absicherung gewonnenen Momentaufnahmen zusätzlich auch der Entwicklungsverlauf an sich zu beachten ist. So werden nicht nur Fehleinschätzungen vermieden, sondern es kann auch die leider oft gängige Praxis verhindert werden, dass immer kurz vor den Meilensteinen die Anstrengungen in der Entwicklung erheblich verstärkt werden, um das gesetzte Ziel doch noch zu erreichen, wobei teilweise Einbußen in der Qualität in Kauf genommen werden. Häufig zeigt sich jedoch im weiteren Verlauf, dass die unter Zeitdruck festgelegten Entscheidungen nicht zielführend waren; sie werden daher rückgängig gemacht, was im Diagramm einem Abfallen des Reifegrades entspricht.

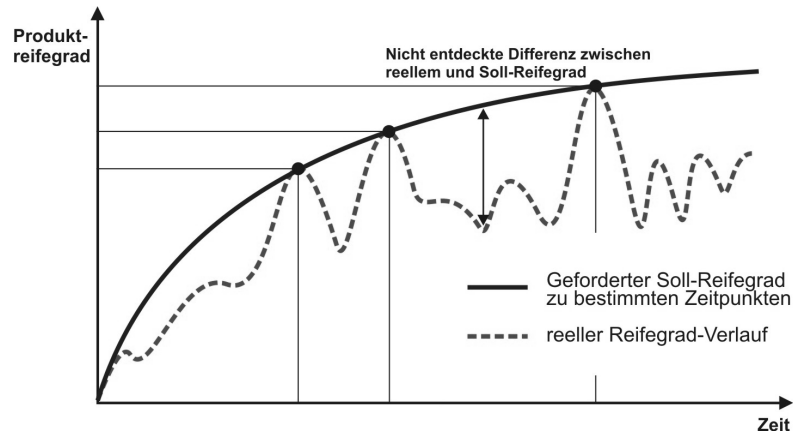


Bild 4: Unentdeckte Differenz von Soll- und Ist-Reifegrad (nach [7])

4 Grundlegendes Konzept zur Ermittlung des Produktreifegrades und des Prozessfortschrittes

Ein Konzept, welches den Reifegrad eines Produktes relativ umfassend und unter mehreren Gesichtspunkten betrachtet, wird in [6] vorgestellt. Da dieses Konzept sehr gut als Ausgangsbasis für eine eigenschaftsbasierte Absicherung herangezogen werden kann, wird es im Folgenden kurz vorgestellt.

PFEIFER-SILBERBACH entwickelt in [6] ein Konzept zur Absicherung des so genannten Konstruktions-Reifegrades, welches neben dem Produkt auch den Verlauf des zugehörigen Entwicklungsprozess mit in die Betrachtung einbezieht. Hierzu wird aus zehn verschiedenen Indikatoren ein Gesamt-Kennwert gebildet. Die Indikatoren lassen sich den Sichtweisen „Prozess“, „Dokumente und Workflow“ sowie „Produkt“ zuordnen. Bild 4 vermittelt einen Überblick über die verwendeten Indikatoren, deren Herleitung und die Sichtweisen.

① erfüllte Meilensteine	Formel (1)	Prozess
② erfüllte Quality-Gates	Formel (1)	
③ erfüllte Sync-Points	Formel (1)	
④ abgearbeitete Teilprojekte	Formel (1)	
⑤ abgearbeitete Arbeitspakete	Formel (1)	
⑥ freigegebene Dokumente	Formel (1)	Dokumente und Workflow
⑦ freigegebene Bauteile	Formel (1)	
⑧ Fortschrittskenner	Tabelle 1, Formel (4)	
⑨ erfüllte Anforderungen	Formel (1)	Produkt
⑩ Entwicklungs-Reifegrad	Formel (5), (6), (7)	

Bild 5: Indikatoren des Konstruktionsreifegrades nach [6]

Diese Indikatoren werden unter individuell festzulegender Gewichtung zum so genannten Konstruktions-Reifegrad verdichtet:

$$K_{\text{Konstruktions-Reifegrad}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\text{Kennzahl}_i \cdot \text{Gewichtung}_i)}{\sum_{i=1}^{10} \text{Gewichtung}_i} \quad (3)$$

Die Kennwerte Nr. 1 - 7 sowie Nr. 9 ermitteln sich dabei analog der Formel (1). Der Kennwert Nr. 8 ist der so genannte Fortschrittskennner nach EIGNER ([6], [9]): Hierbei wird dem Produkt abhängig von der Phase, in der sich dessen Entwicklung befindet und je nach erreichtem Reifegrad ein fester Zahlenwert zugewiesen. Diese Zuweisung wird Tabelle 1 ersichtlich. Dabei ist die Phase der Entwicklung spaltenweise, der dabei erreichte Reifegrad zeilenweise abzulesen. Aus dem Vergleich des zu einem bestimmten Zeitpunkt geforderten Zahlenwerts mit dem tatsächlich erreichten Zahlenwert kann der Fortschrittskennner nach [6] analog Formel (4) gebildet werden. Durch die besondere Verteilung der Zahlenwerte wird der Einschätzung nachgekommen, dass die Freigabe einen wichtigen Meilenstein darstellt und dass ein Verzug in frühen Phasen kritischer zu bewerten ist als einer, der erst in den späten Phasen auftaucht.

Tabelle 1: Zahlenwerte des Fortschrittskennners (nach [6])

Entwicklungsphase⇒ Reifegrad ↗	Design (100)	Entwurf (200)	Muster (300)	Detaillierung (400)	Fertigungs- unterlagen (500)	Nullserie (600)	Serie (700)
(60): Freigabe	160	260	360	460	560	660	760
(50): reserv. freigeg.	150	250	350	450	550	650	750
(40): in Prüfung	140	240	340	440	540	640	740
(30): zurückgewiesen	130	230	330	430	530	630	730
(20): in Arbeit	120	220	320	420	520	620	720
(10): inaktiv	110	210	310	410	510	610	710

$$K_{\text{Fortschrittskennner}} = \frac{\text{aktueller Fortschrittskennner}}{\text{erwarteter Fortschrittskennner}} \quad (4)$$

Der in Bild 4 unter der Nr. 10 zu findende Indikator „Entwicklungs-Reifegrad“ wird nach [6] aus den gewichteten Kennwerten „Konzept-Reifegrad“ und „Produkt-Reifegrad“ gebildet und stellt einen „von der Konzeption des Produktes bis zu seiner abschließenden Gestaltung“ [6] einsetzbaren Indikator dar. Über die Gewichtung G kann dabei der Schwerpunkt je nach Bedarf auf die konzeptuelle Phase der Entwicklung oder eher auf die Ausgestaltung des Produktes gelegt werden. Der Entwicklungs-Reifegrad berechnet sich wie folgt:

$$K_{\text{Entwicklungs-Reifegrad}} = \frac{K_{\text{Konzept-Reifegrad}} \cdot G_{\text{Konzept}} + K_{\text{Produkt-Reifegrad}} \cdot G_{\text{Gestaltung}}}{G_{\text{Konzept}} + G_{\text{Gestaltung}}} \quad (5)$$

Dabei stellt der Bestandteil „Produkt-Reifegrad“ einen geschickten Kompromiss zwischen der Berücksichtigung der erfüllten Anforderungen und der Fixierung auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt freigegebenen Bauteile dar:

$$K_{\text{Produkt-Reifegrad}} = \frac{\text{erfüllte Anforderungen aufgrund freigegebener Bauteile}}{\text{Gesamtzahl der Anforderungen}} \quad (6)$$

Da jedoch erst gegen Ende der Konstruktion die eigentlichen Freigaben erfolgen, lassen sich erst relativ spät in der Entwicklung Änderungen erkennen [6]. Daher wird in die Berechnung

des Entwicklungsreifegrades mit dem „Konzept-Reifegrad“, eine weitere Kennzahl berücksichtigt, welche Auskunft darüber gibt, wie viele der Anforderungen im Konzept bereits berücksichtigt werden. Sie richtet somit den Fokus auf die frühen Entwicklungs-Phasen.

$$K_{\text{Konzept-Reifegrad}} = \frac{\text{im Konzept berücksichtigte Anforderungen}}{\text{Gesamtzahl der Anforderungen}} \quad (7)$$

Mit dem vorgestellten Konzept gelingt es, den Fortschritt des Produktentwicklungsprozesses in die Absicherung des Produktreifegrades mit einzubeziehen und durch anschließende Verdichtung mehrerer unterschiedlicher Kennwerte eine Aussage zum Produkt-Reifegrad abzuleiten. Dennoch existieren bei der eigenschaftsbasierten Produktabsicherung einige weitere Herausforderungen, die im Folgenden kurz zusammengestellt werden.

5 Weitere Herausforderungen bei der Produktabsicherung

Das in Kapitel 4 aufgezeigte Konzept stellt zwar eine umfassende Systematik zur Erfassung des Produktreifegrades zur Verfügung, aber dennoch sind im Kontext einer ganzheitlichen Absicherung des Produktreifegrades weitere Anforderungen zu stellen, für die eine Methodik zur Absicherung des Produktreifegrades geeignete Lösungen bereitstellen muss. Diese Herausforderungen sowie mögliche Lösungswege werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

5.1 Ganzheitliche Absicherung

Eine ganzheitliche Methodik zur Abschätzung des Produktreifegrades muss über die reine Produktbetrachtung hinaus gehen. Dazu muss eine Absicherung sowohl das *Produkt*, den zugehörigen *Prozess* sowie dessen *Beteiligte* berücksichtigen [10].

Produkt: Im Rahmen einer Absicherung ist das gesamte Produkt zu betrachten. Die verbreitete Praxis, lediglich Schwerpunkteile zu verfolgen, ist nicht umfassend genug. Zum einen beruht sie auf (nicht immer ausreichend vorhanden) Erfahrungen bereits abgewickelter Projekte, zum andern vernachlässigt sie einen Teil des Produktes weitestgehend, sodass hier keinerlei Möglichkeiten bestehen, Abweichungen vom Soll frühzeitig festzustellen und geeignet zu begegnen. Es empfiehlt sich eine Absicherung auf mehreren Ebenen, wozu auf Bauteilebene, auf Teilssystemebene und auf Gesamtsystemebene jeweils geeignete Indikatoren auszuwählen sind. Hierbei ist zu beachten, dass die übergeordnete Ebene nicht nur die Summe der untergeordneten Einzelteile darstellt, sondern sich auch Abhängigkeiten ergeben, welche in jeder Ebene erneut einzeln zu betrachten und zu bewerten sind (z.B. Verbindungstechniken, gegenseitiges Stören / Beeinflussen der Bauteile untereinander).

Prozess: Eine ganzheitliche Absicherung des Produktreifegrades muss sich über die gesamte Dauer des zugehörigen Entwicklungsprozesses erstrecken. Dies bedeutet, dass bereits die Konzeptphase mit einbezogen werden muss, da eine erst in der Gestaltungsphase beginnende Reifegradbetrachtung der Forderung einer frühzeitigen Absicherung widerspricht. Zu Beginn der Produktentwicklung ist die Absicherung wichtig, da Eingriffe in frühen Phasen unproblematischer sind als solche in den Phasen, in denen das Produkt nicht mehr wirklich gestaltet, sondern nur noch optimiert werden kann.

Beteiligte: Um den Produktreifegrad abschätzen zu können, bedarf es der Einbindung aller an der Entwicklung beteiligten Mitarbeiter, auch von eventuell vorhandenen Zulieferern: Nur diese Bauteilverantwortlichen garantieren durch ihre fachliche Nähe zum Absicherungsumfang eine fundierte verlässliche Aussage. Im Rahmen der Absicherung sind jedoch nicht nur alle am Entwicklungsprozess beteiligten Stellen, sondern auch alle Stationen, die das Produkt in seinem Lebenszyklus tangiert, zu berücksichtigen: Für die Beurteilung des Produkt-

reifegrades gibt es sehr viele verschiedene Sichtweisen. Ein Produkt kann beispielsweise aus Sicht der Produktentwicklung ausreichend „reif“, jedoch aus Sicht der Logistik oder Verpackung absolut unzureichend sein. Somit sind für die verschiedenen Sichtweisen jeweils eigene Kennwerte zu bilden, die es zulassen, den Reifegrad des Produktes hinsichtlich einer bestimmten Eigenschaft bewerten. Als Sichtweisen können hier beispielsweise die Entwicklung, der Einkauf, die Fertigung, die Montage, der Transport, die Logistik, der Vertrieb sowie das Recycling genannt werden. Letztendlich ist eine solche sichtweisenspezifische Absicherung bestimmter Eigenschaften eine Absicherung hinsichtlich bestimmter DfX-Kriterien.

Die drei Dimensionen *Produkt*, *Prozess* und *Beteiligte* lassen sich durch geeignete Auswahl der herangezogenen Indikatoren integrieren. Bei der resultierenden Kopplung von Produkt und Prozess ist darauf zu achten, dass die Kennwerte zwar geeignet verdichtet werden können, jedoch dabei die Nachvollziehbarkeit gegeben bleiben muss, damit die Ursachen möglicher Abweichungen weiterhin zu identifizieren sind.

5.2 Geeignete Granularität

Eine geeignete Methodik muss eine anpassbare Granularität der Informationsdarstellung erlauben, um dem Informationsbedürfnis sowohl auf Ebene des Managements, als auch auf der Ebene der Bauteilverantwortlichen nachkommen zu können. So wird der Gesamtprojektverantwortliche eher einen schnellen Überblick über das gesamte Produkt benötigen, während der Bauteilverantwortliche wesentlich detaillierte Informationen über einen kleineren Bereich wünscht. Aufgrund der Vielzahl von Indikatoren auf jeder Ebene der Produkthierarchie, über die Sichtweisen aller Prozessbeteiligten und über den gesamten Prozessverlauf hinweg ergibt sich bei geeigneter Wahl der Indikatoren die Möglichkeit einer sehr detaillierten Absicherung. Durch die Verdichtung der einzelnen Indikatoren können verschiedene übergeordnete Indikatorgruppen uns somit aussagekräftige Kennwerte über bestimmte Umfänge erreicht werden [11]. Dadurch, sowie durch die Möglichkeit, bestimmte Indikatoren zu individuellen Kennwerten verdichten zu können, wird eine solche Systematik sowohl den Bauteilverantwortlichen als auch der Managementsicht gerecht. Wichtig ist hierbei, dass nicht nur Gesamtwerte, sondern auch Werte der jeweiligen Beitragsleister verfügbar sein müssen, da die resultierende Gesamt-Kennzahl keine Aussage über deren Zustandekommen zulässt.

5.3 Absicherung auf Basis unsicherer Daten

Eine weitere Schwierigkeit bei der Abschätzung des Reifegrades ist darin zu sehen, dass unsichere Daten im Entwicklungsverlauf meist nicht weitergegeben werden, um zu vermeiden, dass weiterführende Aktivitäten auf dieser unreifen Basis durchgeführt werden. Dadurch kann nicht sichergestellt werden, dass immer alle Informationen über jeden Indikator verfügbar sind. Die Verwendung weniger Indikatoren führt wiederum zu ungenauen Kennzahlen. Dieser Problematik kann durch einen mehrstufigen Freigabeablauf nach [8] beigegeben werden: Hierbei zeigt die erste Stufe an, dass die Unterlagen nur zur Information dienen, ohne Gewähr dafür zu geben, dass sich keine grundlegenden Änderungen mehr ergeben. Die zweite Stufe zeigt einen seriennahen Entwicklungsstand an, während die dritte Stufe einer verbindlichen Freigabe ohne Einschränkungen gleichkommt. Als Hilfestellung zur Einschätzung der Freigabestufe bietet sich ein in [12] vorgestellter Ansatz zur Einstufung des Reifegrades von Entwicklungsdaten an. Die Kennzeichnung des „Verlässlichkeitsgrades“ der Informationen erfolgt dabei anhand der fünf Kriterien „Gewissheit“, „Genauigkeit“, „Beständigkeit“, „Letzte Aktualisierung“ sowie „Vollständigkeit“. Mit dieser Einteilung können Informationen bei ihrer Weitergabe objektiv und für alle Empfänger deutlich als „unreif“ oder „unsicher“ gekennzeichnet werden. Jeder Empfänger kann nun selbst abschätzen, inwieweit ihm diese Daten als Grundlage für die weitere Entwicklung dienen sollen.

5.4 Unbekannter Zielwert der einzelnen Indikatoren

Bei der Abschätzung des Standes der Entwicklung ist die Frage nach dem Zeitpunkt wichtig, an dem die Entwicklung als abgeschlossen angesehen werden kann. So lassen sich drei unterschiedliche Sichtweisen vertreten: Einerseits kann die Produktentwicklung mit Erfüllung aller Anforderungen und somit mit der Freigabe der letzten das Produkt betreffenden Merkmalsfestlegungen als beendet angesehen werden. Andererseits kann das Erstellen der Nutzungs- und Fertigungsunterlagen mit in die Produktentwicklung einbezogen werden, auch wenn während dieser Vorgänge das Produkt an sich keinen Fortschritt mehr im Sinne einer Reifegradsteigerung erfährt. Die Produktentwicklung wäre somit erst nach Fertigstellung der vollständigen Dokumentation beendet (Sichtweise analog zur VDI-Richtlinie 2221 [13]). In der dritten weitestgehenden Sichtweise wird nicht nur der Anlauf der Produktionsphase, sondern auch eine eventuell stattfindende Serienbetreuung als Teil der Produktentwicklung angesehen, da das Produkt auch während der Serienlaufzeit durch Änderungen eine gewisse Entwicklung erfährt, beispielsweise durch fertigungstechnische Anpassungen oder neue Materialien. Welche dieser Sichtweisen heranzuziehen ist, ist für jede Entwicklung von Fall zu Fall individuell zu entscheiden. Ein weiterer Fall von unbekanntem Zielwert ist im Fall einer Änderungs- und Anpassungskonstruktion zu beachten: Hier darf bei der Kennzahlbildung als Soll-Wert eines Indikators nicht die Gesamtanzahl aller Bauteile oder Dokumente angenommen werden, da sich ansonsten im Falle einer relativ kleinen Anzahl an zu ändernden Bauteilen oder Dokumenten schon zu Beginn des Prozesses ein Reifegrad von annähernd 100% ergäbe. Als Soll-Wert muss daher in diesem Fall die Gesamtzahl der im Rahmen der Anpassung zu ändernden Bauteile eingesetzt werden. Bei Neukonstruktionen hingegen ist zu Beginn kein Soll-Wert im Sinne einer vorgegebenen Zahl an Bauteilen oder zu erstellenden Dokumenten vorhanden. Erst mit Erstellen der Produktstruktur ein solcher Soll-Wert vorhanden, kann sich aber im Verlaufe der Detaillierung noch ändern. In den aufgezeigten Fällen kann manchmal nur eine qualitative Abschätzung des Fortschrittes anhand der Unterschiede zweier aufeinander folgenden Konstruktionsständen vorgenommen werden.

5.5 Individualität der Indikatoren

Indikatoren wie beispielsweise die Anzahl der freigegebenen Dokumente oder der erfüllten Produktanforderungen zeigen häufig erst gegen Ende der Konstruktionsphase einen signifikanten Anstieg. Auch ist zu beachten, dass die meisten Indikatoren über den Verlauf des Prozesses unterschiedlich stark gewichtet und für das Projekt unterschiedlich lang relevant sind. Beispielsweise wird der Indikator „Konstruktionsfreigabe“ im Projektfortschritt wesentlich früher benötigt als beispielsweise ein Indikator, der bei Serienanlauf eines Produktes die tatsächlich produzierte Stückzahl pro Zeitraum mit dem ursprünglich geplanten Wert vergleicht. Ein Kennwert auf Basis der Anforderungen kann beispielsweise recht früh angegeben werden, während eine auf die Anzahl freigegebener Dokumente bezogene Kennzahl erst recht spät gebildet werden kann, nämlich dann, wenn die genaue Anzahl der erforderlichen Dokumente bekannt ist. Andere Indikatoren wie „Gewichtsvorgabe“ und „Herstellkosten“ sind dagegen beide über die gesamte Projektdauer relevant. Die für jeden Indikator individuelle Charakteristik aus spätem Anstieg, des unterschiedlichen Relevanzverlaufs und die individuelle Dauer der Gültigkeit erschwert die realitätsnahe und nachvollziehbare Erfassung des Projektfortschrittes erheblich, weshalb sie bei der Auswahl der Indikatoren unbedingt hinreichend zu berücksichtigen ist. Einen möglichen Ansatz stellt hier die dynamische Gewichtung der herangezogenen Indikatoren dar: Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Reifegradabsicherung an verschiedenste Faktoren angepasst werden kann. So kann zum einen der menschlichen, subjektiven Einschätzung nach gekommen werden und ein Indikator mit niedrigem Reifegrad stärker gewichtet werden, als ein solcher mit hohem Reifegrad. Zum anderen können nicht aussagefähige Indikatoren abgeschwächt oder ausgeblendet werden. Durch dieses Vorgehen kann gewährleistet werden, dass sich die Konzentration stärker auf die weniger reifen Indikatoren konzentriert.

5.6 Virtuelle Absicherung und Absicherung anhand von realen Prototypen

Bei der Absicherung ist zwischen der virtuellen Absicherung auf Basis von Daten und der Hardware-Absicherung anhand von Prototypen zu unterscheiden. Bei der virtuellen Absicherung ist die Reife der verwendeten Daten zum einen, und die Nähe des virtuellen Modells zur Realität zum anderen ein wichtiger Punkt. Die Reife der Daten meint in diesem Zusammenhang die Aussagefähigkeit eines Datensatzes, welche von verschiedenen Faktoren (z.B. Vollständigkeit, Detaillierungsgrad sowie Aktualität) abhängt. Die Nähe des virtuellen Modells zur Realität lässt sich am besten am Beispiel von biegeschlaffen Teilen wie Kabeln oder Schläuchen im CAD-Modell erläutern: Da solche flexiblen Bauteile mit geringer Eigensteifigkeit im CAD-Modell als starrer Körper modelliert werden, liegt hier vom Verhalten her ein großer Unterschied zwischen Modell und realem Bauteil vor, was bei der Ermittlung des Reifegrades zu beachten ist. Auch bei der Absicherung anhand von Prototypen sind einige Besonderheiten zu beachten: Zum einen handelt es sich meist um Entwicklungsstände, die nicht mit den zukünftigen Serienfertigungs-Prozessen gefertigt wurden. Zusätzlich geschieht die Absicherung während der Entwicklung nicht mit denselben Methoden und Werkzeugen, mit denen die Qualitätskontrolle in der laufenden Serienfertigung durchgeführt werden wird. Eingehende Untersuchungen zu dieser Problematik finden sich in [7] und [14].

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden ein Konzept zur Produktreifegrad-Absicherung sowie unterschiedlichste notwendige und mögliche Erweiterungen aufgezeigt. Zusätzlich zur Priorisierung durch Höhergewichtung kritischer Umfänge kann die Absicherung durch weitere dynamische Anteile erweitert werden. Durch Integration weiterer Gewichtungsanteile kann eine individuelle, jedoch nachvollziehbare Reifegraderfassung erreicht werden. Zusätzlich zu einer solchen Methodik kann der Digital Mock-up (DMU) mit in die Reifegradbetrachtung einbezogen werden. Ein vorhandener DMU kann als Indiz für den nahen Abschluss einer Phase bzw. den Übergang zu einer anderen Phase und damit Anzeichen für einen bestimmten Reifegrad gewertet werden. Das Vorhandensein eines Bauteils im DMU ist Indikator für einen gewissen Fortschritt, auch wenn daraus allein keine Aussagen zur Detaillierung oder zum tatsächlichen Reifegrad abzuleiten ist. Einen weiteren Anhaltspunkt zur Unterstützung der Reifegradabschätzung bietet die Beobachtung der Anforderungsliste. Gelingt es, bestimmte Produkteigenschaften einer bestimmten Produktkonkretisierung zuzuordnen, kann bei durchgängiger Beobachtung der im Prozessverlauf zusätzlich in die Anforderungsliste aufgenommenen Randbedingungen und Produkteigenschaften ein umfassender Eindruck über den Produktreifegrad gewonnen werden.

7 Literatur

- [1] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen *Konstruktionslehre*. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1984
- [2] Paetzold, K.: Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer Produkte. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum „17. Symposium Design for X“, 12.-13. Oktober 2006, Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 2006.
- [3] Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktionstätigkeit. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1976.
- [4] Weber, C.: CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In: Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on advances in methods and systems for development of product and processes. TU Berlin / Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), 07.-08. Juli 2005, p.159-179, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2005.

- [5] Chakrabarti, A.: Engineering Design Synthesis – Understanding, approaches and tools. London: Springer Verlag, 2002.
- [6] Pfeifer-Silberbach, U.: Ein Beitrag zum Monitoring des Reifegrades eines Produktes in der Entwicklung. Fachbereich Maschinenbau an der technischen Universität Darmstadt; Dissertation; Shaker Verlag, Aachen 2004.
- [7] Müller, M; Bär, T.; Weber, C.: Was ist Reifegrad? In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum „16. Symposium Design for X“, 13.-14. Oktober 2005, Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 2005.
- [8] Fischer, W.; Dangelmaier, W.: Produkt- und Anlagenoptimierung – Effiziente Produktentwicklung und Systemauslegung. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [9] Eigner, M.; Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme - Ein Leitfaden für Product Development und Lifecycle-Management. Springer Verlag, 2001.
- [10] Weinzierl, J.: Produktreifegradmanagement in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken – Ein ganzheitlicher Ansatz zur Unterstützung im strategischen Anlaufmanagement. Reihe „Fabrikorganisation“, Hrsg: Prof. Dr.-Ing. A. Kuhn, Lehrstuhl für Fabrikorganisation der Universität Dortmund, Dissertation, 2006.
- [11] N.N.: Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette – Produktentstehung – Reifegradabsicherung für Neuteile – Methoden, Messgrößen, Dokumentationen, Checklisten. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Frankfurt am Main, 2006.
- [12] Grebici, K.; Blanco, E.; Rieu, D.: Toward non mature information management in collaborative design processes. In: Samuel, H.; Lewis, W. (Hrsg.): Proceedings on the 15th International Conference on Engineering Design 2005 (ICED 05), Melbourne, 15.-18. August 2005.
- [13] N. N.: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. In: VDI-Handbuch Konstruktion, Berlin. Beuth Verlag GmbH Berlin Düsseldorf, 1993.
- [14] Müller, M; Bär, T.; Weber, C.: The digital maturity map - motivation for an EDM-based digital validation method. In: Marjanović, D. (Hrsg.): Proceedings on the 9th International Design Conference (Design 2006), Dubrovnik, 15.-18. Mai 2006.
- [15] Leemhuis, H.: Funktionsgetriebene Konstruktion als Grundlage verbesserter Produktentwicklung. Fakultät V für Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin; Dissertation; 2004.

Dipl.-Ing. Hartmut Krehmer; Dr.-Ing. Kristin Paetzold
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
FAU Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen
Tel: +49-9131-85-23216
Fax: +49-9131-85-23223
Email: krehmer, paetzold@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>