

MEHRKÖRPERSIMULATION UNTER BERÜCKSICHTIGUNG NICHT-IDEALER GELENKE UND INTEGRATION DIESER IN DAS KONSTRUKTIONSSYSTEM *mfk*

Rüdiger Hochmuth, Michael Koch

Kurzfassung

Der Beitrag gliedert sich gemäß des Titels in zwei Hauptbereiche. Zum einen wird die Integration nicht-idealer Gelenkgeometrien in die kinematisch-kinetische Mehrkörpersimulation gezeigt. Des Weiteren wird die Integration genannter Simulationsmethode in das Konstruktionssystem *mfk* präsentiert und die notwendigen Strukturen des darunterliegenden Produktmodells dargelegt.

1 Motivation und Aufgabenstellung

Die kinematisch-kinetische Simulation mechanischer Baugruppen gehört zum Stand der Technik. In den frühen Entwicklungsphasen werden derartige Simulationen zur Bestimmung des kinematischen Verhaltens genutzt, in späteren Entwicklungsphasen wird der Einfluss des teilweise entworfenen Bauteilverbands auf das Gesamtverhalten hinsichtlich Struktur und Kinetik untersucht und optimiert. Einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Genauigkeit derartiger Mechanismen stellen Spiele in den Gelenken dar, die zum einen für die Funktion unerlässlich sind und zum anderen aus nicht vermeidbaren Fertigungsabweichungen herrühren.

Aus diesem Grund ist es für ein umfassendes „Predictive Engineering“ unerlässlich, die „Realisierungsungenauigkeiten“ (Mogens Myrup Andreasen, persönliches Gespräch auf dem Symposium „Design for X“, Schnaittach, 2000), in die Simulation des kinematisch-kinetischen Verhaltens eines Mechanismus zu integrieren. Einige wenige Ansätze auf diesem Gebiet existieren, sie variieren allerdings hauptsächlich bestehende maßliche CAD-Parameter oder legen via einer MonteCarloSimulation die Eingangsgrößen für ein Mehrkörpersystem fest. Im Rahmen unseres Ansatzes [1, 2, 3] wird auf der Grundlage der MKS-Beschreibung nach [4] ein Koppelvektor eingeführt, der gemäß den Reaktionskraftrichtungen ausgerichtet wird.

Eine Simulationsmethode für den Konstrukteur macht nur Sinn und wird von ihm auch nur genutzt, wenn sie in einem sinnvollen Werkzeug, nach Möglichkeit in seiner hauptsächlich genutzten Entwicklungsumgebung, angeboten wird. Die Einbindung vorgenannter Methode in die geforderte „Engineering Workbench“ oder das „Konstruktionssystem“ mit einem zugrundeliegenden Produktmodell kann dem Konstrukteur den Gedanken des umfassenden „Predictive Engineering“ näher bringen.

2 Integration nicht-idealer Gelenke in die Mehrkörpersimulation

Die Kapitelüberschrift bezieht sich allgemein auf nicht-ideale Gelenke. Unterschieden werden soll an dieser Stelle bewusst, ob die Simulation in einer Konzept- oder einer Entwurfsphase geschehen soll. In einer früheren, geometriearmen, funktionsorientierten Entwicklungsphase existiert eine Konzeptskizze mit den Nennmaßen bzw. der Nenngeometrie (Bild 6). Die Posi-

tionier-, Wiederhol- oder Anfahrgenauigkeit rührt aus der Anforderungsliste her und muss bereits in der Konzeptphase bedacht werden. Hierzu besteht die Möglichkeit, die maximal erlaubte „Ungenauigkeit“ auf die einzelnen betroffenen Abschnitte, hier die Koppelgelenke, zu verteilen und in einer ersten Simulation den Einfluss dieser nicht-idealen Gelenke auf das kinematische Verhalten zu simulieren (Bild 1 oben).

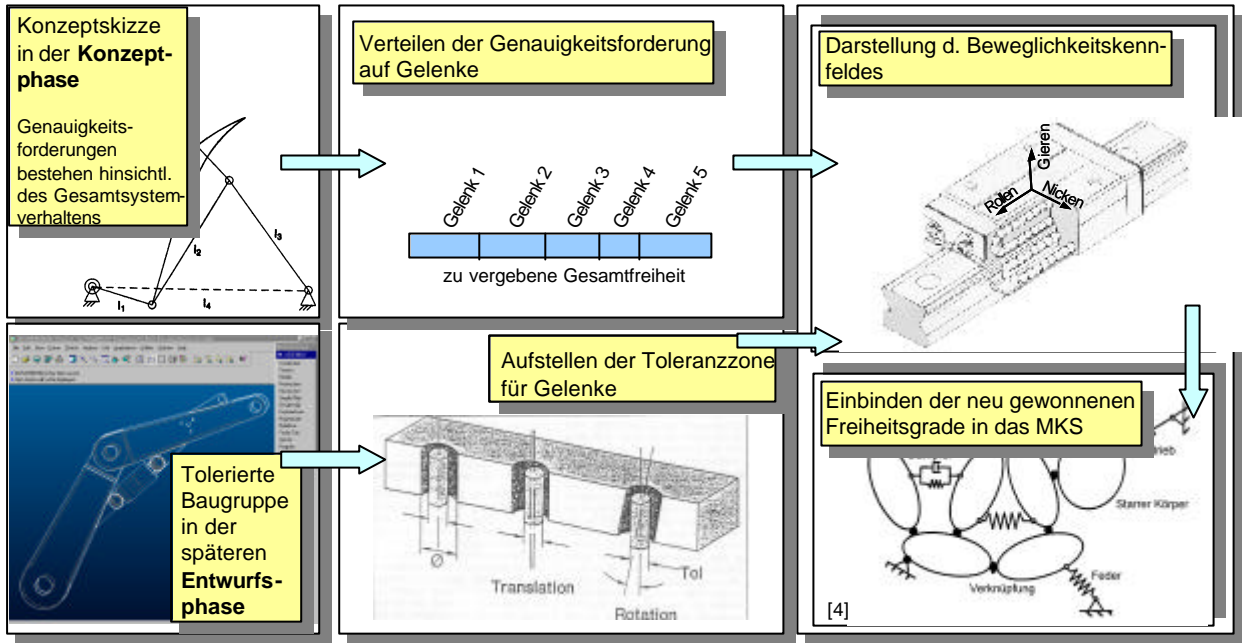


Bild 1: Konzept der Integration nicht-idealer Gelenke in die MKS-Simulation

Die maximalen Bewegungen der einzelnen Gelenke können in einer abgeleiteten Matrix, ähnlich [5], beschrieben werden. Die Aufstellung des Gleichungssystems wird gemäß [4] erfolgen. In der Beschreibung der kinematischen Ketten tritt jetzt als neue Komponente ein Koppelvektor ein.

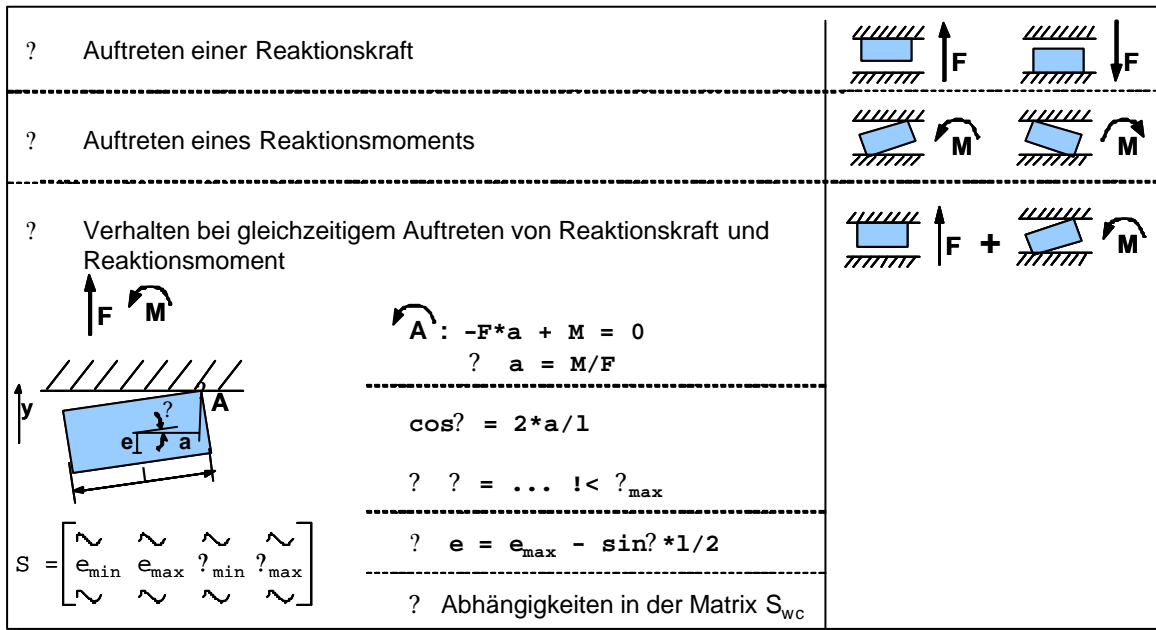


Bild 2: Regelwerk zur Steuerung des Koppelvektors im Gelenk

Dieser Koppelvektor wird entsprechend der Größe der erlaubten Beweglichkeit auf Maximalausschlag gefahren und durch die Richtung der Reaktionskraft bzw. des -moments im Gelenk ausgerichtet (Bild 2). Die Bestimmung des Koppelvektors erfolgt also nicht etwa, wie bei anderen Ansätzen, auf der Basis einer MonteCarloSimulation, sondern wird gemäß des natürlichen Verhaltens über die Reaktionskraft bzw. das Reaktionsmoment gesteuert (Bild 2).

Dies ermöglicht dem Konstrukteur bereits in dieser frühen Phase den Aspekt der Genauigkeit zu betrachten und das kinematische Verhalten des Mechanismus unter diesem Aspekt zu simulieren. Ferner können die Ergebnisse der Simulation für die Auswahl geeigneter Gelenktypen, Gelenkgeometrien und Toleranzwerte für Standardtolerierungen der Gelenkkomponenten nach Lösungskatalogen Hilfestellung liefern; denn die angesprochene Genauigkeit muss im nächsten Schritt durch Toleranzangaben, d.h. die Einschränkung der erlaubten „Realisierungsgenauigkeiten“, abgebildet werden.

Diese Weiterentwicklung des Konzepts zum geometriereicheren, gestaltorientierten Entwurf bedarf weiterer Untersuchungen, wobei hier bereits ein Tolerierungsvorschlag vorliegt (Bild 1 unten). Für diesen Fall, bereits tolerierter Komponenten, ist die Beschreibung des Beweglichkeitskennfeldes zu ermitteln. Die weitere Vorgehensweise gleicht der oben beschriebenen. Der vorliegende Tolerierungsfall kann mit dem Analysepaket VSA [6] in die Beschreibung des Beweglichkeitskennfeldes umgerechnet werden (Bild 3).

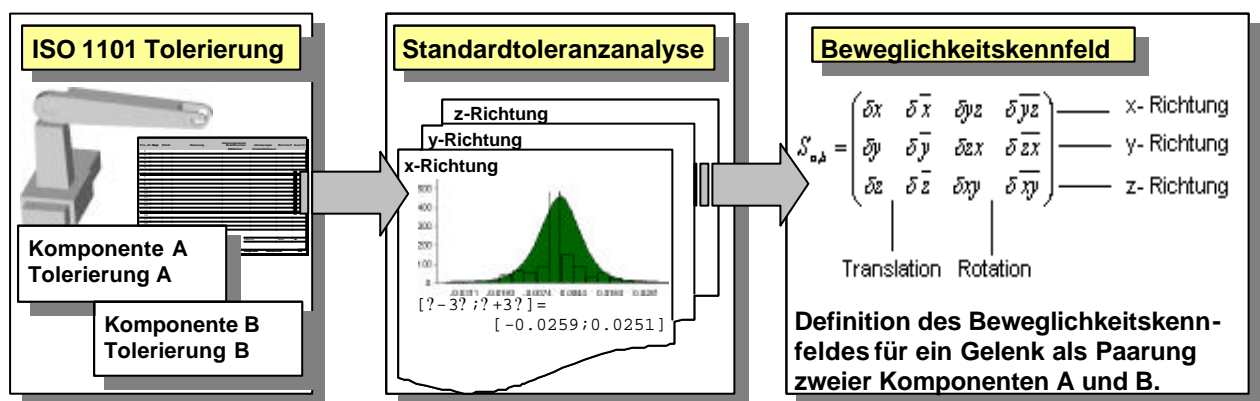


Bild 3: Transformation der ISO1101-Tolerierung zur vektoriellen Tolerierung bis zur Matrix

Der Vorteil des dargestellten Verfahrens liegt darin, dass sowohl die Einflüsse der Gelenkspiele auf das kinematische Verhalten abgebildet werden kann, als auch die kinetischen Antworten des Systems durch die nicht-idealen Gelenke „realitätsnäher“ ausfallen.

3 Notwendigkeit einer Integration in eine Engineering Workbench

Der Konstruktionsprozess ist ein iterativer Vorgang mit wechselseitigen Synthese- und Analyseschritten und mit dem Ziel einen Konstruktionsfortschritt zu erzielen. In diesem Fortschreiten nutzt der Konstrukteur diverse Regeln, die sich ihrerseits auf Methoden und Fakten aufbauen. Ein Baustein dieser komplexen Prozedur kann die beschriebene Methode sein. Eine Methode kann aber nur so stark sein, wie sie zum Einsatz kommt und dann auch nur, wenn sie mit entsprechenden Informationen versorgt wird. Dann allerdings, wenn diese Randbedingungen gegeben sind, kann sich, im Sinne des „predictive engineering“ ein schnellerer und effizienterer Konstruktionsfortschritt ergeben. Die hier beschriebene Notwendigkeit der Zusammenfassung von Analyse- und Synthesemethoden, wie auch der Regeln und Fak-

ten in ein integrales System, wird in der Literatur als „Engineering Workbench“ oder „Konstruktionssystem“ beschrieben.

4 Integration der Methode in das Konstruktionssystem *mfk*

Die Basis für eine solche Engineering Workbench wurde vor mehr als zehn Jahren am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik gelegt: Das Konstruktionssystem *mfk* (*KSmfk*). Seitdem wird dieses System kontinuierlich ausgebaut und weiterentwickelt. Es ist ein Ansatz, die Differenzen zwischen den Vorstellungen eines Konstrukteurs an ein CAD-System und den real existierenden Softwarepaketen durch die Verwendung von semantische Beschreibungsmerkmale zu minimieren ([7], [8]).

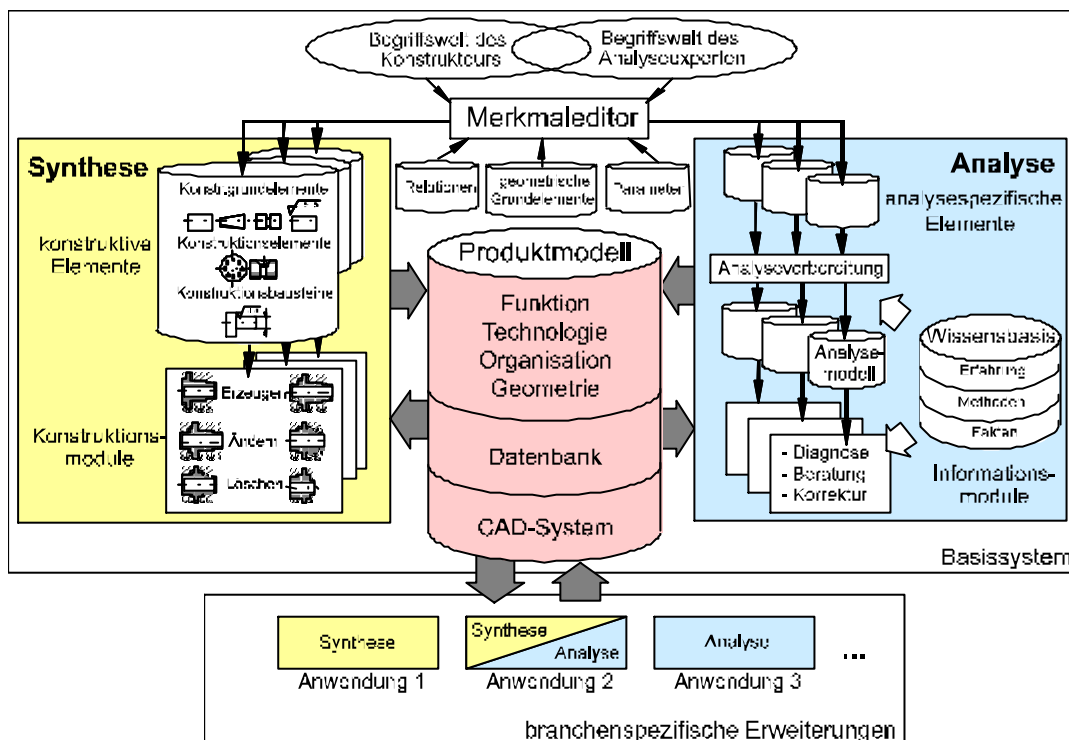


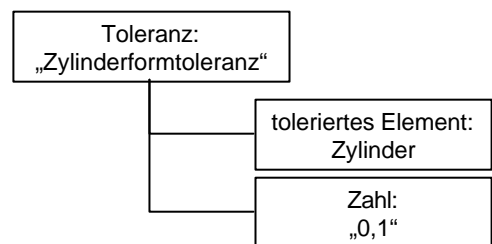
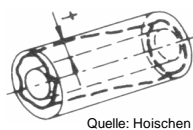
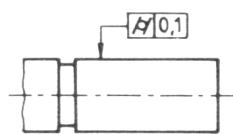
Bild 4: Das Konstruktionssystem *mfk* (*KSmfk*): aktueller Entwicklungsstand

Innerhalb des semantischen und relationsbasierten Produktmodells stehen Beschreibungsmerkmale zur Verfügung, die das gesamte Konstruktionswissen aufnehmen können. Das *KSmfk* basiert auf leistungsfähigen CAD-Systemen, deren Funktionalität zur Benutzerführung und Visualisierung der Daten verwendet wird. In verschiedenen Umsetzungsgraden wurden die gängigen CAD-Systeme mit dem *KSmfk* verbunden. Die aktuellen Entwicklungen basieren auf Pro/ENGINEER (PTC Corporation, Massachusetts), das bei diesem Vergleich am besten abschnitt. Um die besonderen Anforderungen von variablen Produktfamilien und Entwicklungslevels erfüllen zu können, ist das Konstruktionssystem *mfk* in verschiedene Module unterteilt, zum Beispiel für Blechkonstruktionen oder Gussteile. Das Konzept des *KSmfk* besteht aus einem Syntheseteil, in dem das Produkt aufgebaut und beschrieben wird, und aus einem Analyseteil, mit dem das Produkt auf verschiedene DfX-Kriterien (Design for X [9]) untersucht werden kann. Eine Verbindung dieser Teile ist durch das Produktmodell und den Merkmaleditor gegeben.

Das Konstruktionssystem bietet durch sein hybrides, relational (mereologisch) aufgebautes Produktmodell und durch die Verwendung einer leistungsfähigen kommerziellen Datenbank eine ideale Basis, um verschiedene Anwendungsmodule zu integrieren. Als ein neuer Bestandteil des Konstruktionssystems soll der Ansatz der Kopplung der kinematisch-kinetischen Simulation von Mechanismen mit der Toleranzanalyse in das bestehende System integriert werden. Dazu sind mehrere Schritte notwendig: Zunächst müssen alle Daten, die zur Verwaltung der Toleranzinformationen benötigt werden, festgelegt werden. Dann kann man die Strukturen des Produktmodells entsprechend diesen Vorgaben anpassen und aktualisieren.

Die Anzahl der unterschiedlichen Toleranzen, die ein Konstrukteur gemäß der ISO1101-Tolerierung vergeben kann, sind begrenzt; in [10] ist eine Übersicht über alle Form-, Lage- und Maßtoleranzen sowie deren Ausprägungen gegeben. Im Folgenden sollen prototypisch einige charakteristische Toleranzen herausgegriffen werden. Als Formtoleranz kommt zum Beispiel die Zylinderformtoleranz in der Praxis sehr häufig zum Einsatz. Hier muss die tolerierte Zylindermantelfläche zwischen zwei koaxialen Zylindern mit einem bestimmten Abstand liegen. Möchte man diese Toleranz im Produktmodell abbilden, um sie im Konstruktionssystem *mfk* einsetzen zu können, so sind neben der Toleranzausprägung an sich noch die tolerierte Zylindermantelfläche und der Abstand der beiden fiktiven koaxialen Zylinder abzuspeichern (Bild 5). Nach diesem Schema lässt sich bei allen weiteren Formtoleranzen verfahren, lediglich die Anzahl und Art der benötigten Referenzelemente (Flächen, Zylindermantelflächen, Linien, usw.) variiert.

Zylinderformtoleranz



Rechtwinkligkeitstoleranz

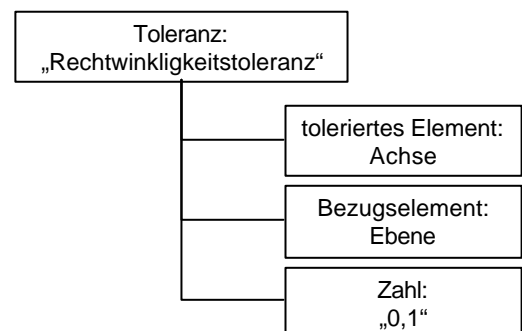
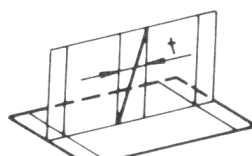
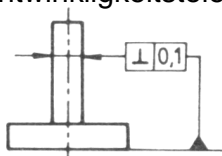


Bild 5: verschiedene Toleranzausprägungen in ihrer üblichen Schreibweise und als relationale Darstellung im Produktmodell [8, 12]

5 Strukturen des Produktmodells

Vor der eigentlichen Umsetzung der bereits dargelegten Toleranzinformationen ist zu klären, wie weit die Modularität in diesem Punkt vorangetrieben werden soll. Es ist durch das mereologische Prinzip, das ja zum Beispiel auch in der Attributierung im Produktmodell angewendet

wird, durchaus möglich, die verschiedenen Toleranzausprägungen durch eine Entity-Relationship-Beziehung abzubilden [8, 12]. Dadurch wird prinzipiell zwar mehr Variabilität erreicht, der Verwaltungsaufwand steigt aber sehr stark an. Des Weiteren ist die Anzahl aller möglichen Toleranzausprägungen endlich, genauer gesagt sind in der einschlägigen Literatur [10] sechzehn Form- und Lagetoleranzen beschrieben. Diese geringe und fixe Anzahl von Toleranzausprägungen macht eine feste Implementierung in getrennten Tabellen möglich. Dadurch wird die sowohl die Toleranzdatenverwaltung als auch die Ein- und Ausgabe der Informationen erheblich vereinfacht.

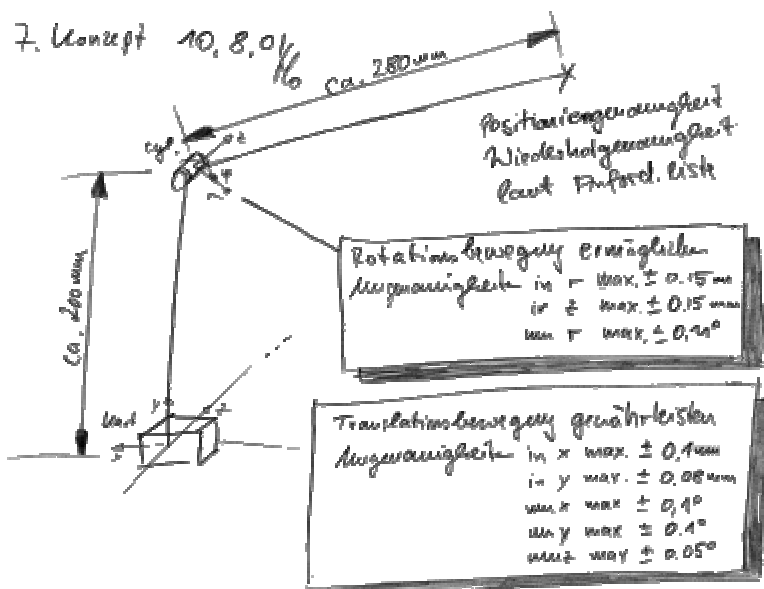
Der Aufbau der Datenstrukturen für das Verwalten der Toleranzen gestaltet sich demnach folgendermaßen: Für jede Toleranzausprägung wird ein Table (Tabelle) in der Datenbank angelegt. Dieser beinhaltet die Informationen, die zur eindeutigen Identifizierung im Entity-Relationship-Modell nötig sind (beispielsweise eine eindeutige Identifizierungsnummer ID). Des Weiteren werden alle Daten, die zur vollständigen Beschreibung der jeweiligen Toleranzausprägung notwendig sind, gespeichert. Dazu gehören im speziellen Fall der Zylinderformtoleranz zum Beispiel das tolerierte Zylinderelement und der Toleranzwert, der den Abstand der beiden koaxialen Hüllzylinder beschreibt.

Toleranz_{Zylinderform} (Nummer, Bezeichnung, Objekt-Nummer, Zylinderelement-Nummer, Double-Wert, Bemerkung)

Diese Toleranzen stehen durch die Angabe von Objekt-Nummer und Element-Nummer immer in direktem Zusammenhang mit dem tolerierten Feature. Die eindeutige Zuordnung ist daher zu jedem Zeitpunkt möglich.

Eine Fortführung des Ansatzes, Toleranzinformationen im Konstruktionssystem mfk zu verwalten, ist das Einbeziehen dieser Informationen (die ursprünglich mit Bauteilen verknüpft sind) in den Zusammenbau der Einzelteile (Abbildung des Beweglichkeitskennfeldes). Hierdurch wird die eingangs geforderte Modellierung nicht-idealer Gelenke möglich.

Bei der Modellierung von Baugruppen kommen zu den tolerierten Bauteilen weitere Elemente hinzu, die die Verbindungen darstellen. Diese zusätzlichen Elemente besitzen keine Geometrie, sondern dienen in erster Linie dazu, die zusammengehörigen Toleranzangaben der Einzelteile zu verbinden und eine direkte Relation zwischen den tolerierten Flächenelementen zu ermöglichen. Weiterhin wird in jedem Koppellement das Beweglichkeitskennfeld des Gelenks abgelegt. Dieses steht dann für spätere Berechnungen und Analysen in der Datenbank zur Verfügung.



Da der gesamte Ansatz des Konstruktionssystems mfk eine durchgängige Unterstützung des Konstruktionsprozesses anstrebt, ist bereits die Beachtung der Ungenauigkeiten auch in den geometrielosen Phasen (also vor allem der Konzeptphase) zu berücksichtigen. Hier liegen allerdings noch keinerlei dreidimensionale Informationen über das Produkt vor. Die Ungenauigkeiten werden bei fehlen-

Bild 6: eine „tolerierte“ Skizze in einer frühen Phase (Konzeptphase)

den Wirkflächen mit ungefähren Angaben versehen (Bild 6), bei bereits modellierten Wirkflächen wäre es denkbar, ISO 1101-Toleranzen anzuwenden. Deshalb müssen einerseits die Voraussetzungen im Produktmodell geschaffen werden, um ein solch „informationsarmes“ Modell zu unterstützen. Andererseits wird ein Werkzeug benötigt, um dem Konstrukteur die Eingabe dieser Daten in das Produktmodell überhaupt zu ermöglichen. Zur Unterstützung der frühen Phase ist es nötig, die nur abstrakt vorliegenden Produktbereiche so zu beschreiben, dass eine eindeutige Positionierung der Elemente gegeneinander möglich ist. Dazu werden die Kontaktpunkte jedes Elements zu anderen Elementen in einem lokalen Koordinatensystem verwaltet und als zweidimensionale Beschreibung der skizzierten Geometrie im Produktmodell abgelegt. Da für eine vollständige Tolerierung sowohl die Bezugsflächen als auch die Möglichkeit fehlen, die korrekte Toleranzausprägung anzugeben, ist es in dieser Konstruktionsphase sinnvoll, Ungenauigkeiten der Bewegungen als „±-Toleranz“ anzugeben (Bild 6). Diese Werte können analog zu den beschriebenen Toleranzen im Entity-Relationship-Modell abgelegt und später für Simulationen weiter verwendet werden.

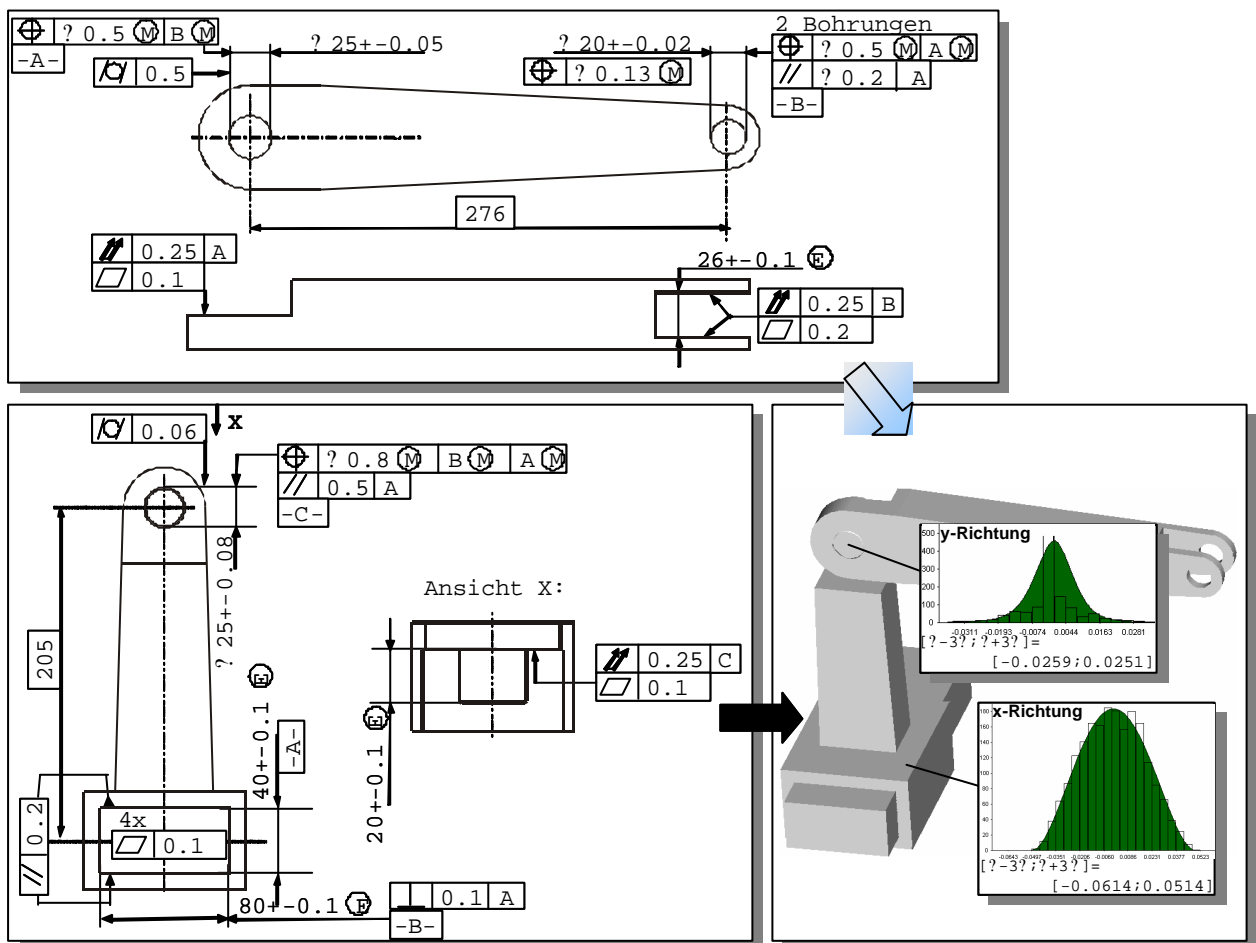


Bild 7: Darstellung der Toleranzen in den späten Phasen mit vorliegender Geometrie

In den geometrieorientierten Phasen der Konstruktion kann auf die CAD-Geometrie der Bauteile zurückgegriffen werden. Daher ist eine Unterstützung dieser Phasen relativ einfach zu realisieren.

In Bild 7 ist die bereits bekannte Prinzipskizze (Bild 6) in einer späteren Phase zu sehen. Hier liegt bereits Geometrie vor, die Einzelteile wurden vollständig modelliert und toleriert. Durch diese Toleranzangaben ist eine Simulation des kinematisch-kinetischen Verhaltens der Bau-

gruppe möglich, die eine Vorhersage der Positionier- und Wiederholungsgenauigkeiten an den Funktionselementen möglich macht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Ansatz zur Simulation des kinematisch-kinetischen Verhaltens von Mechanismen auf Basis nicht-idealer Gelenke vorgestellt. Weiterhin konnten die dazu gebrauchten Informationen so aufbereitet werden, dass sie innerhalb des Produktmodells des bestehenden Konstruktionssystems *mfk* verwaltet werden können. Für die erstellten Datenstrukturen wurde erkannt, dass für die verschiedenen Abschnitte des Konstruktionsprozesses jeweils angepasste Strukturen nötig sind, da sehr unterschiedliche Informationen abzubilden und aufzubereiten sind.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Hochmuth, R.: „Ansätze zur Beurteilung der Genauigkeit Technischer Systeme“, In: 11. Symposium „Design for X“ (Hrsg. H. Meerkamm), Schnaittach, 2000, S. 25-30.
- [2] Hochmuth, R.; Meerkamm, H.: „Approach to Evaluate the Precision of Technical Systems“, In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001.
- [3] Geißdörfer, St.: „Einbinden von Toleranzinformationen in das Mehrkörpersystem“, Studienarbeit FAU Erlangen-Nürnberg, 2001.
- [4] Eberhard, P.; Schiehlen, W.: „Hierarchical Modeling in Multibody Dynamics“, In: Applied Mechanics 68, Springer-Verlag, 1998, S. 237 – 246.
- [5] Roth, K.: „Konstruieren mit Konstruktionskatalogen“, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [6] N.N.: „VSA Trainingshandbuch“, 2001
- [7] Bachschuster, S.: „Architektur und Konzept zur Realisierung eines produktspezifisch erweiterbaren Konstruktionsassistenzsystems“, Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1997.
- [8] Weber, A.: „Ein relationsbasiertes Datenmodell als Grundlage für die Bauteiltolerierung“, Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1992.
- [9] Meerkamm, H.: „Design for X - A Core Area of Design Methodology“, Journal of Engineering Design Vol. 5 No.2, Carfax, Coventry, 1994, S. 145-163.
- [10] Jordan, W.: „Form- und Lagetoleranzen“, Hanser Lehrbuch, München, 1998.
- [11] Hoischen, H.: „Technisches Zeichnen“, Cornelsen Verlag, Berlin, 1996.
- [12] Hochmuth, R.: „Konstruktionsbegleitende Analyse auf Fertigbarkeit von Toleranzfestlegungen auf Basis des Konstruktionssystems *mfk*“, 8.Symposium „Fertigungsgerechtes Konstruieren“, Schnaittach, Oktober 1997, S. 49-60.

Dipl.-Ing. Michael Koch
 Dipl.-Ing. Rüdiger Hochmuth
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
 Universität Erlangen-Nürnberg
 91058 Erlangen, Martensstr. 9, Deutschland
 Tel: +49 9131 85 27984 / 27987
 Fax: +49 9131 85 27988
 Internet: mlkoch@mfk.uni-erlangen.de
hochmuth@mfk.uni-erlangen.de
<http://www.mfk.uni-erlangen.de>