

# Bausteinbasierte Mechanismensynthese mit CAD-integriertem Pre- und Postprocessing

## Building Block Based Mechanism Synthesis with CAD-integrated Pre- and Postprocessing

Simon Laudahn, M.Sc., Lst. für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, TU München, simon.laudahn@tum.de

Richard Haslauer, BMW AG, München, richard.haslauer@bmw.de

Dr.-Ing. Kassim Abdul-Sater, Lst. für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, TU München, kassim.abdul-sater@tum.de

Dr.-Ing. Franz Irlinger, Lst. für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, TU München, irlinger@tum.de

Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth, Lst. für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, TU München, tim.lueh@tum.de

### Kurzfassung

Diese Arbeit stellt einen Ansatz für die CAD-integrierte finite Posensynthese ebener Gelenkgetriebe dar. Die Synthese ist bausteinbasiert, d. h., dass komplexere Getriebe aus kleineren Bausteinen (bspw. der RR-Kette) zusammengestellt werden können. Die optimierungsbasierten SyntheseprozEDUREN ermöglichen ein hohes Maß an Flexibilität durch die Nutzervorgabe von Bauraumrestriktionen aller Gelenkpunkte und von Gewichtungen beliebig vieler Bewegungsposen der Körper. Durch die Integration in eine CAD-Umgebung können konstruktionsbedingte Änderungen der Bewegungsaufgabe im CAD direkt an die Kinematikauslegungsoftware weitergegeben werden. Geänderte Mechanismenlösungen der Kinematikauslegung können wiederum das Modell im CAD aktualisieren.

### Abstract

This paper shows an approach for the CAD-integrated finite position synthesis of planar linkages. The synthesis is building block based, i.e. more complex linkages can be built from smaller building blocks (e.g. RR chain). The optimization-based synthesis procedure allows for a high degree of flexibility by allowing the user to specify restrictions for all joints and any number of weighted poses of the bodies. Integration in a CAD environment allows design-related changes to the movement task in CAD to be passed on directly to the kinematics design software. Modified mechanism solutions of the kinematics design can in turn update the model in CAD.

## 1 Einleitung

Die komplette Entwicklung und Konstruktion vieler komplexer technischer Produkte, beginnend von den einzelnen Bauteilen hin zur kompletten Baugruppe, kann innerhalb von CAD-Systemen erfolgen. Aus den so konstruierten Teilen können direkt technische Zeichnungen oder die Programme der Fertigungsmaschinen zur Herstellung abgeleitet werden. Neben diesen eigentlichen Funktionalitäten der Konstruktion bieten CAD-Programme darüber hinaus unterschiedliche Hilfsmittel zur Analyse, wie beispielsweise die FEM-, Bewegungs- oder Kollisionsanalyse.

Dagegen existieren zur Auslegung von Gelenkgetrieben unterschiedliche Softwarewerkzeuge, die bei der Synthese und Analyse von Mechanismen unterstützen sollen. Neben Programmen, die primär in der Forschung verwendet werden, existieren auch kommerzielle Lösungen. Durch verschieden ausgeprägte Datenaustauschmöglichkeiten zwischen CAD-Programmen und diesen Kinematik-Softwarewerkzeugen, kann der mögliche Grad an CAD-Integration als fließend angesehen werden. So reichen die Software-Werkzeuge von unabhängiger *Stand-Alone*-Software bis hin zu vollständig CAD-integrierten Werkzeugen.

Im folgenden Überblick werden verschiedene Auslegungsprogramme bzgl. ihrer Möglichkeiten zum Datenaustausch

und Mechanismen-Synthesefunktionalitäten beschrieben. Das System *GENESYS* [1], das von den 1990ern bis 2008 entwickelt wurde, kann als Stand-Alone-Anwendung gesehen werden, die sowohl Funktionalitäten zur Synthese als auch Analyse von ebenen Getrieben beliebiger Bauformen enthält. Für die Synthese gibt es in *GENESYS* Werkzeuge für die Vorgabe von 3, 4 oder 5 Lagen und Synthesebausteine für die Dreigliedergruppe und den Zweischlag. Datenim- und export ist in einem Tabellenformat möglich. Das Programm *APPROX* mit dem Programm *OPTIMA* [2] ermöglicht optimierungsbasierte Synthese von Getrieben unter der Vorgabe unterschiedlicher Bewegungsaufgaben, wie bspw. Bahnkurven von Koppelpunkten oder Lagen allgemein bewegter Ebenen. Es bestehen Exportmöglichkeiten in das .xls-Format.

Ein kommerzielles Software-Werkzeug zur Synthese und Analyse ist *ASOM* [3], das im Bereich der Synthese über 2 und 3 Lagen für Vier- und Siebengelenke verfügt. Datenaustausch ist über Dateien möglich.

Ein Add-In in die CAD-Umgebung *Solidworks* der Fa. Dassault Systèmes ist *Mechanism Generator* [4], das die Auslegung von ebenen und sphärischen Vier- und Siebengelenken mit der Vorgabe von 5 Lagen ermöglicht.

Die sich in der Entwicklung befindliche Software *Mech-Dev* [5] zur Entwicklung ebener Mechanismen zeichnet



sich durch eine Erweiterbarkeit der Funktionalität mittels Plug-Ins und eine interaktive graphische Bedienoberfläche aus. Export von Ergebnissen, wie bspw. die Kontur von Kurvenscheiben, ist möglich.

Die kommerzielle Software *SAM* [6] verfügt über Exportmöglichkeiten hin zum CAD über das Drawing Interchange Format (DXF). Für die Synthese stehen für Viergelenke Werkzeuge zur Winkellagenzuordnung, 3-Posen-Synthese und Geradfürungen zur Verfügung.

Die Software, die in [7] beschrieben wird, läuft vollständig in der CAD-Umgebung *CATIA* der Fa. Dassault Systèmes. Sie ermöglicht die Synthese von Viergelenken unter der Vorgabe von 2 oder 3 Lagen und bestimmten Siebgelenken unter Vorgabe von 2 Lagen. Zusätzlich sind Einschränkungen für einige Gelenkpunkte vorgebar.

Die in [8] entwickelte Software ermöglicht die Synthese eines bestimmten Watt-Siebgelenks. Unter der Vorgabe von bis zu 30 Lagen können Pose-Informationen im CSV-Tabellenformat importiert werden. Auf Grund der Überspezifikation durch die Anzahl an Posen erfolgt die Synthese innerhalb eines polygonalen Bauraums optimierungsbasiert und die Bewegung des erzeugten Getriebes nähert die vorgegebenen Posen an. Die Abmessungen des synthetisierten Getriebes können ebenfalls über ein Tabellenformat an das CAD-System *CATIA* übergeben werden.

## 2 CAD-integrierte Mechanismenauslegung

Diese Arbeit stellt einen Ansatz für die CAD-integrierte finite Posensynthese ebener Gelenkgetriebe bestehend aus Drehgelenken am Beispiel von *CATIA V5* dar. Die Synthese ist bausteinbasiert, d. h., dass komplexere Getriebe aus kleineren Bausteinen zusammengestellt werden können. Die verwendeten Bausteine sind das Drehgelenk, die RR-Kette, die RRR-Kette sowie die Dreigliedergruppe (s. Abb. 6). Es können für Körper eine beliebige Anzahl an Posen vorgegeben und somit die Anzahl der theoretisch exakt erreichbaren Posen überschritten werden. Für überspezifizierte Bewegungsaufgaben erfolgt dann eine Näherungslösung, wobei diese durch vorgebbare Gewichtungen für die einzelnen Posen gezielt beeinflusst werden kann. Um einen hohen Grad an Einfluss auf den Bauraum nehmen zu können, können für alle Gelenkpunkte Restriktionen, d. h. erlaubte Bereiche, vorgegeben werden. Das Programm bewertet die möglichen Lösungen des entsprechenden Getriebebausteins innerhalb dieser Restriktionen.

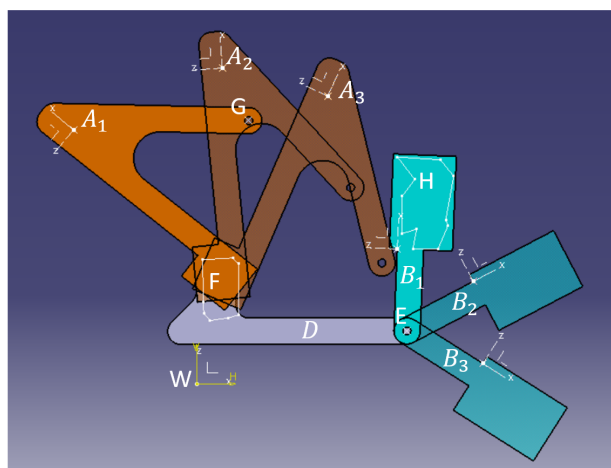
Die Kommunikation zwischen der CAD-Umgebung und der Auslegungssoftware geschieht über eine COM-Schnittstelle. COM steht für *Component Object Model* und ist eine vom Betriebssystem Windows verwendete Technik um Daten zwischen verschiedenen Prozessen auszutauschen. Im konkreten Fall wird die COM-Schnittstelle zu *CATIA* zum einen genutzt, um Daten wie bspw. Koordinaten von Punkten oder Posen von Achsensystemen aus dem CAD auszulesen, um sie der Berechnung zur Getriebe-

beauslegung zur Verfügung zu stellen. Zum anderen werden über die Schnittstelle von der Getriebe-Software berechnete Objekte wie Punkte und Linien in *CATIA* automatisch gezeichnet oder aktualisiert.

### 2.1 Preprocessing

Zu Beginn muss der Nutzer festlegen welches momentan in *CATIA* geöffnete *Part* (= Dateiformat für ein Bauteil in *CATIA*) zur Definition der Eingangsgrößen für die Auslegung verwendet werden soll.

Anschließend wählt der Nutzer die Ebene eines Achsensystems in *CATIA* aus, in welchem die Auslegung des Mechanismus stattfindet. Im Fall von *CATIA* sind Achsensysteme lokale Koordinatensysteme, die vom Nutzer unter der Angabe von geometrischen Bedingungen und Abhängigkeiten in einem Bauteil (*Part*) beliebig positioniert und orientiert werden können. Darüber hinaus muss die Anzahl der Posen angegeben werden, die für die Synthese aller Getriebebausteine (RR-Ketten, etc.) verwendet werden soll. Die Syntheseaufgabe wird im wesentlichen durch zwei Elemente bestimmt. Zum einen die Bewegungsaufgaben von Körpern und zum anderen den Bereichen (*Restriktionen*) in denen sich Gelenkpunkte aufhalten dürfen. Die Syntheseaufgabe in Abb. 1 soll im Folgenden als Beispiel dienen.

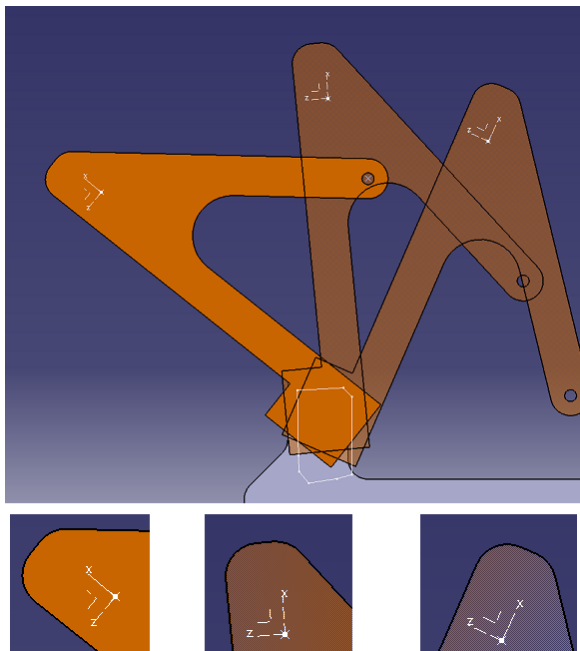


**Bild 1** Eine Syntheseaufgabe wurde im CAD vorbereitet. Es soll eine Winkellagenzuordnung zwischen dem orangenen Körper mit den drei Lagen  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  und dem türkisen Körper mit den drei Lagen  $B_1$ ,  $B_2$  und  $B_3$  erfolgen. Das Gestell ist in der Abbildung mit  $D$  beschriftet. Für die vier Gelenkpunkte sind Restriktionen definiert (in der Abbildung bezeichnet mit  $E$ ,  $F$ ,  $G$  und  $H$ ).

#### 2.1.1 Definition von Bewegungsaufgaben

Die Vorgabe der Posen der Bewegungsaufgabe (*Task*) jedes zu führenden Körpers erfolgt über Achsensysteme im CAD (s. Abb. 2). Diese setzt der Nutzer so, dass sie die gewünschte Bewegung des Körpers abbilden. In der Bedienoberfläche der Getriebe-Software können dann sogenannte *Tasks*, d. h. Bewegungsaufgaben für Körper angelegt werden. Innerhalb einer Importfunktion wird der Nut-

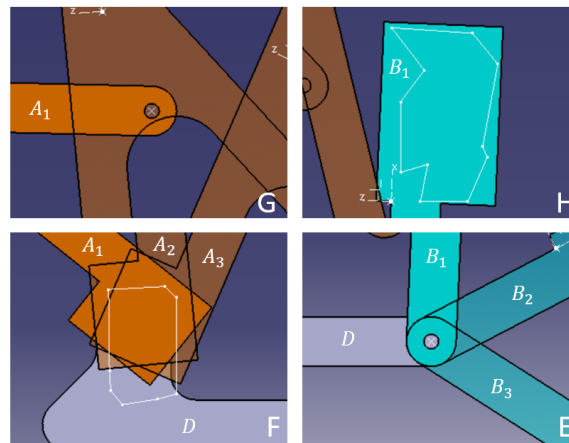
zer dann aufgefordert für jeden Task die zugehörigen Achsensysteme in der richtigen Reihenfolge im CAD zu selektieren. Dadurch wird für jeden zu führenden Körper und das Gestell ein Task im Programm angelegt. Da im Auslegungsprogramm für jede Pose jedes Körpers die Verknüpfung zum zugehörige Achsensystem in CATIA gespeichert wird, können Achsensysteme im CAD jederzeit verschoben werden und der entsprechende Task über eine Updatefunktion aktualisiert werden.



**Bild 2** Task eines Körpers definiert im CAD über drei Achsensysteme für eine Drei-Posen-Synthese.

### 2.1.2 Definition von Gelenkpointsrestriktionen

Als Restriktion eines Gelenkpoints wird der Bereich bezeichnet in welchem sich dieser in Lage 1 befinden soll. Das Auslegungsprogramm unterstützt hierbei drei verschiedene Arten von Restriktionen: Diese sind eine Menge einzelner Punkte (*Pointset*), ein stetiger Linienzug (*Polyline*) oder ein Polygon. Die Definition der Restriktionen der Gelenkpunkte erfolgt im CAD über *Sketche*. Sketche sind zweidimensionale Zeichnungen. In der Bedienoberfläche der Getriebesoftware wird für jeden Gelenkpunkt eine Restriktion angelegt. Beim Import einer Restriktion aus dem CAD wird der Nutzer aufgefordert einen Sketch in CATIA auszuwählen. (s. Abb. 3). Die Koordinaten aller Punkte im Sketch werden hierbei in alphabetischer Reihenfolge (in der Regel ist das die Reihenfolge ihrer Erzeugung) übertragen. Andere Geometrieobjekte wie bspw. Linie im Sketch werden ignoriert. Zusätzlich wählt der Nutzer in der Bedienoberfläche, ob es sich bei der Restriktion um ein Pointset, eine Polyline oder ein Polygon handelt. Im Fall von Polyline oder Polygon muss der Nutzer auch eine Rastergröße angeben, da die Restriktionen für die Synthese diskretisiert werden. Jede Restriktion im ist mit ihrem Sketch im CAD verknüpft, so dass Änderungen am Sketch im Auslegungsprogramm aktualisiert werden können.



**Bild 3** Die Gelenkpointsrestriktionen aus dem Beispiel als Sketche (weiße Umrisse, bzw. weiße Kreuze) im CAD.

E: Der Gelenkpunkt zwischen *B* und *D* sei schon bekannt. Für die Modellierung im Auslegungsprogramm wird deswegen im CAD ein einzelner Punkt an die Stelle als Restriktion gesetzt.

F: Die drei Posen von *A* sind so gewählt worden, dass es einen Drehpunkt gibt. In diesem Fall soll aber das Programm den optimalen Drehpunkt innerhalb der polygonalen Restriktion finden.

G: Der Gelenkpunkt zwischen *A* und der noch nicht existenten Koppel des Viergelenks wurde genau durch einen Punkt als Restriktion gefordert.

H: Der Gelenkpunkt zwischen *B* und der Koppel soll innerhalb dieses Polygons liegen.

## 2.2 Bausteinbasierte Synthese

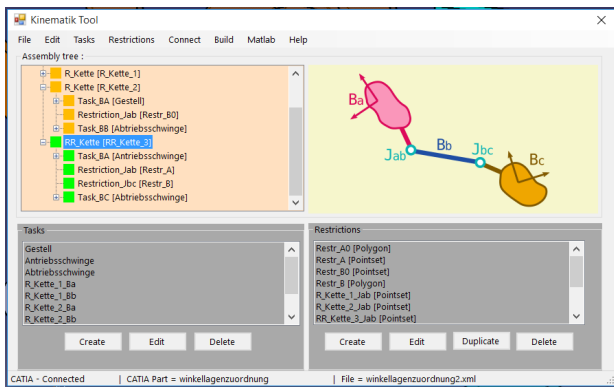
Für die Synthese stehen dem Nutzer mehrere Getriebebausteine zur Verfügung (vgl. Abb. 6). Diese werden jeweils mit einer spezifischen Anzahl an Tasks und Restriktionen parametrisiert. Anschließend werden alle Lösungen eines Bausteins daraufhin bewertet wie diese generell in der Lage sind, ihre Tasks unter Einhaltung der Restriktionen zu erreichen. Die Anzahl der Lösungen bestimmt sich aus der Anzahl der Möglichkeiten wenn aus jeder diskreten Restriktion jeweils ein Kandidat mit denen der anderen Restriktionen kombiniert wird. Alle Lösungen eines Bausteins liegen in Form einer geordneten Liste vor mit den Lösungen, die die Posen am besten erreichen, oben. Für eine vom Nutzer ausgewählte Lösung für den Baustein wird anschließend berechnet, wie die Körper des Bausteins ihre Tasks tatsächlich erreichen, da ein exaktes Erreichen im Allgemeinen bei einer überspezifizierten Synthese mit beliebig vielen Posen und zusätzlicher Vorgabe von Gelenkpointsrestriktionen nicht möglich ist. Die angenäherten Posen für jeden Körper werden jeweils zu einem Task zusammengefasst. Diese *Output-Tasks* können zur Parametrisierung weiterer Getriebebausteine herangezogen werden. Für den Baustein der RR-Kette findet sich der detaillierte Ablauf des verwendeten Syntheseverfahrens in [9].

Die Synthese der Getriebestruktur erfolgt implizit über die Parametrisierung der einzelnen Getriebebausteine, indem Bausteine mit gleichen Tasks oder mit den Output-Tasks anderer Bausteine parametrisiert werden.

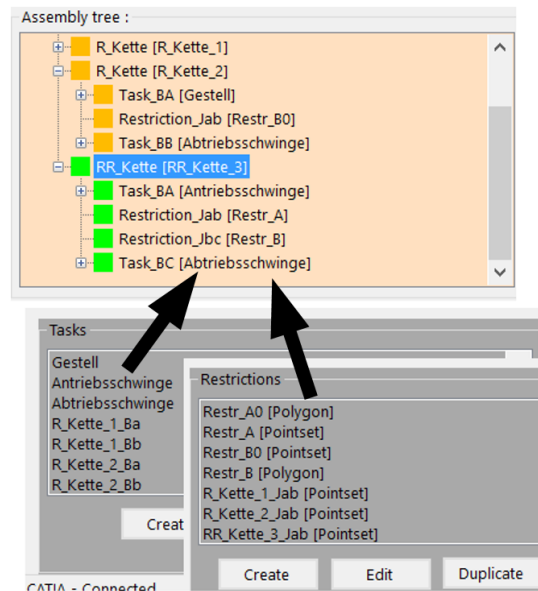
Ein weiteres Werkzeug zur Steuerung der Syntheselösungen ist die Möglichkeit innerhalb eines Bausteins für die

einzelnen Posen jedes Task Gewichte zu vergeben, die die Lösungen zu Gunsten der Erreichung der hoch gewichteten Posen in der Bewertung favorisiert. Um das Ergebnis der Berechnung der Näherungslösung für eine gewählte Lösung zu beeinflussen, kann für jede Pose außerdem eine Gewichtung der Orientierung gegenüber der Position vorgenommen werden. Darüber hinaus kann für einen Körper des Bausteins gewählt werden, dass dieser von dem Baustein exakt erreicht wird während nur die anderen Körper angenähert werden. Diese Option sollte für das Gestell gewählt werden.

Die Hauptbedienoberfläche besteht im Wesentlichen aus drei Elementen: Einer Liste aller Tasks, einer Liste aller Restriktionen und einer Baumstruktur zum Aufbau des Mechanismus (s. Abb. 4). Neue Getriebebausteine werden in der Baumstruktur angelegt und mittels *drag and drop* mit Tasks und Restriktionen aus den jeweiligen Listen parametrisiert (s. Abb. 5).



**Bild 4** Bedienoberfläche mit den drei Hauptelementen: Baumstruktur zum Aufbau des Mechanismus aus Getriebebausteinen (oben links), Liste der Tasks (unten links), Liste der Restriktionen (unten rechts).

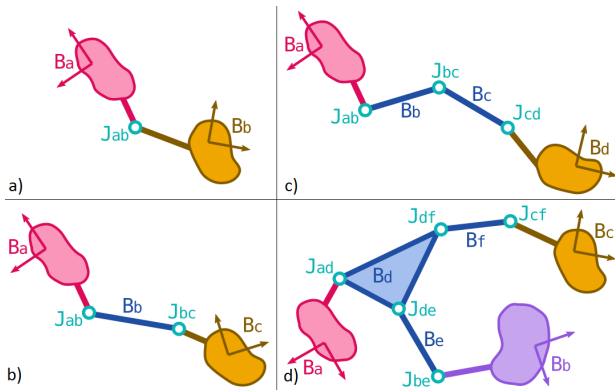


**Bild 5** Die Getriebebausteine in der Baumstruktur werden mittels *drag and drop* mit Tasks und Restriktionen aus den Listen parametrisiert. Sowohl die gezeigte R-Kette als auch die gezeigte RR-Kette verwenden für einen Task die „Antriebsschwinge“. Auf diese Art und Weise erfolgt über die Verwendung von Tasks für den gleichen Körper in unterschiedlichen Bausteinen die Verknüpfung zum Gesamtmechanismus.

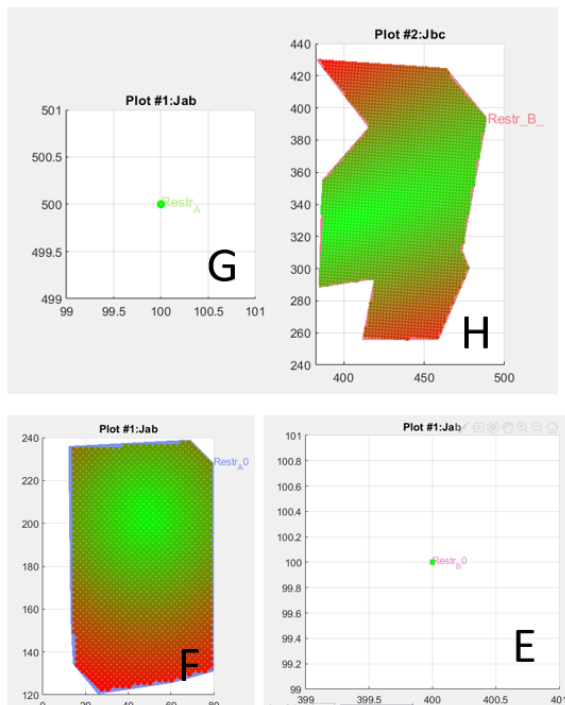
Für die Synthese stehen dem Nutzer folgende Getriebebausteine zur Verfügung (s. Abb. 6):

- Das einzelne Drehgelenk / die R-Kette: Dieser Baustein besteht aus zwei Körpern und einem die Körper verbindendes Drehgelenk. Für beide Körper müssen Tasks vorgegeben werden. Die Restriktion für das Gelenk ist optional. Optional bedeutet, dass bei Vorgabe einer Restriktion nur Lösungen innerhalb der Restriktion berücksichtigt werden. Falls keine Restriktion vorgegeben wird, wird die beste mögliche Lösung unter Berücksichtigung der Gewichtungen der Posen gesucht.
- Die RR-Kette: Dieser Baustein besteht aus drei Körpern und zwei Drehgelenken. Für die beide äußeren Körper des Bausteins müssen Tasks vorgegeben werden. Es können für beide Gelenke oder nur für eines Restriktionen vorgegeben werden.
- Die RRR-Kette: Dieser Baustein besteht aus vier Körpern und drei Drehgelenken. Für die beide äußeren Körper des Bausteins müssen Tasks und für alle Gelenke Restriktionen vorgegeben werden.
- Die Dreigliedergruppe (Bezeichnung wie in [10] und [11]): Dieser Baustein besteht aus sechs Körpern und fünf Drehgelenken. Er kann als eine Kombination von RR-Kette mit einer RRR-Kette aufgefasst werden. Für die drei äußeren Körper des Bausteins müssen Tasks vorgegeben werden. Es müssen entweder für alle Gelenke oder nur für die drei äußeren Gelenke ( $J_{ab}$ ,  $J_{be}$  und  $J_{cf}$ ) Restriktionen angegeben sein. Letzteres ist aktuell noch nicht vollständig integriert.





**Bild 6** Die Getriebebausteine des Programms. Körper sind mit  $B_i$  („body“) und Gelenke mit  $J_{ij}$  („joint“) bezeichnet. Jeweils für die Körper mit eingezeichnetem Koordinatensystem müssen für die Parametrisierung des Bausteins Tasks vorgegeben werden. Im Allgemeinen sind im Programm für alle Gelenkpunkte Restriktionen zu definieren. Für die R-Kette, die RR-Kette und die Dreigliedergruppe besteht allerdings die Möglichkeit bestimmt Restriktionen frei zu lassen. In der Abbildung: a) Drehgelenk oder R-Kette. b) RR-Kette. c) RRR-Kette. d) Dreigliedergruppe.



**Bild 7** Farbverläufe für die Lösungen der Bausteine für obiges Beispiel. Die Farbverläufe gehen von guten Lösungen (grün), die die Posen gut erreichen hin zu schlechteren Ergebnissen (rot). E: Punktförmige Restriktion der R-Kette zwischen  $D$  und  $B$ . F: Restriktion der R-Kette zwischen  $D$  und  $A$ . Für diese wurde ein Polygon vorgegeben. Da die drei Posen von  $A$  so gewählt waren, dass ein Drehpunkt existiert, zeigt sich auch im Farbverlauf ein kreisförmig variierender Farbverlauf um die exakte Lösung. G und H: Farbverläufe für die Lösung der RR-Kette. Da für die Restriktion G auf Körper  $A$  nur ein Punkt vorgegeben wurde, zeichnet sich für die Drei-Posen-Synthese im Farbverlauf der polygonalen Restriktion (H) des anderen Gelenkpunkts ebenfalls ein punktförmiges Optimum aus. Wie zu erwarten ändert sich der Farbverlauf im Polygon von der exakten Lösung hin weg nach außen von grün zu rot.

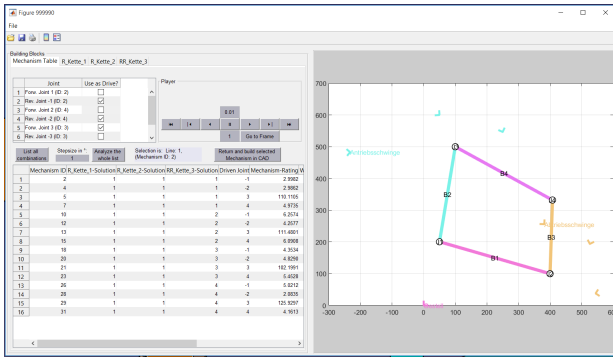
Im obigen Beispiel für die Winkellagenzuordnung (vgl. Abb. 1) werden für die Modellierung drei Bausteine benötigt. Diese sind eine R-Kette zwischen dem Gestell  $D$  und dem Körper  $A$ . Eine weitere R-Kette zwischen dem Gestell  $D$  und dem Körper  $B$ . Eine RR-Kette zwischen den Körpern  $A$  und  $B$  mit den Restriktionen, die in der Abbildung mit  $G$  und  $H$  bezeichnet sind.

Die Syntheselösungen jedes Bauteils können graphisch betrachtet werden. Das Programm plottet dazu einen Farbverlauf in die Restriktionen, der angibt in welchen Bereichen der Restriktionen Gelenkpunktskandidaten mit guten Lösungen für den Baustein liegen. (s. Abb. 7)

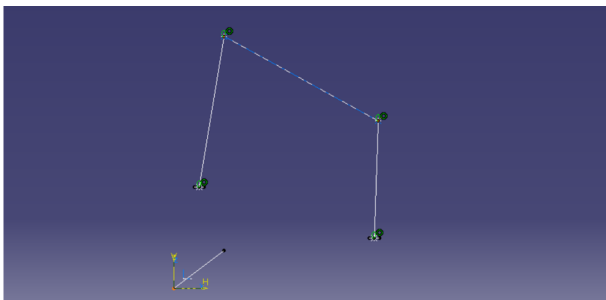
### 2.3 Analyse des Mechanismus und Post-processing

Ist aus den Bausteinen ein Mechanismus mit Freiheitsgrad  $F = 1$  zusammengesetzt, so kann dieser direkt automatisch im CAD als animierbare Strichkinematik aufgebaut werden. Werden anschließend für einen oder mehrere Bausteine andere Lösungen ausgewählt, kann die Strichkinematik im CAD aktualisiert werden.

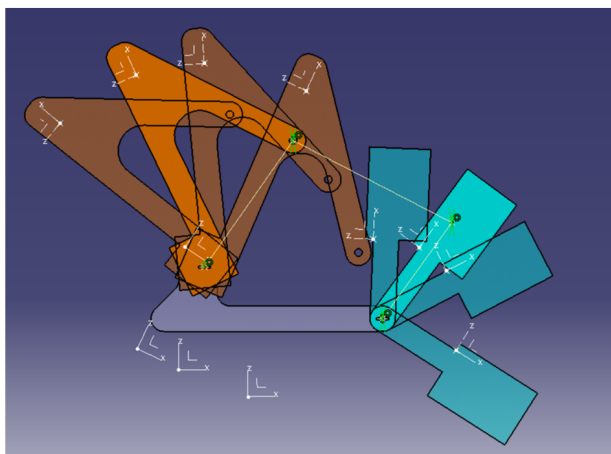
Statt direkt die Strichkinematik aufzubauen, kann eine Analyse des Mechanismus durchgeführt werden (s. Abb. 8). Dies ist sinnvoll, da eine erfolgreiche Synthese mit guten Lösungen für die einzelnen Bausteine nicht garantiert, dass auch der zusammengesetzte Gesamtmechanismus in der Lage ist, sich durch die (angenäherten) Lagen wie gefordert zu bewegen. Die Analyse ermöglicht eine Stapelverarbeitung, bei der für jeden der Getriebebausteine mehrere Lösungen ausgewählt und mit mehreren Lösungen der anderen Bausteine kombiniert werden können. Zusätzlich können unterschiedliche Gelenke als zu testende Antriebsgelenke gewählt werden. Die Stapelverarbeitung prüft dann alle aus Bausteinen kombinierten Mechanismen darauf, ob sie die Posen erreichen, wie gut sie die Posen erreichen, ob sie die Posen in der richtigen Reihenfolge erreichen und wie groß die Übertragungswinkel während der Bewegung sind. Falls die gewählte Lösung für die Bausteine keinen funktionsfähigen Gesamtmechanismus liefert, ermöglicht es die Stapelverarbeitung unter Umständen einen funktionsfähigen Mechanismus bestehend aus schlechteren Lösungen der einzelnen Bausteine zu finden. Analysierte Mechanismen können zum Vergleich als Strichkinematik animiert werden und die Verläufe der Übertragungswinkel betrachtet werden. Ein ausgewählter Mechanismus kann anschließend automatisch im CAD als animierbare Strichkinematik erzeugt werden (s. Abb. 9). Basierend auf dieser Strichkinematik können dann weitere Konstruktionen im CAD erfolgen, um die Kinematik für ihren Verwendungszweck weiter zu evaluieren (s. Abb. 10).



**Bild 8** Bedienoberfläche für die Analysefunktionen. In der Tabelle werden alle für die Analyse gewählten Lösungskombinationen mit ihrer Analysebewertung für den Mechanismus gelistet. Die Bewegung eines Mechanismus lässt sich in der rechten Graphik betrachten.



**Bild 9** Die vom Programm aus der ausgewählten GetriebeLösung automatisch erzeugte animierbare Strichkinematik im CAD.



**Bild 10** Die animierte Strichkinematik (gezeigt in einer Zwischenstellung der Bewegung zwischen Lage 1 und 2) im CAD mit eingefügten Bauteilen aus der ursprünglichen Konstruktion (vgl. Abb. 1). In blasser Farbe sind die drei Vorgabelagen gezeigt.

### 3 Diskussion

#### 3.1 CAD-Integration

Die CAD-Integration erstreckt sich für die hier beschriebene Methodik zum einen darauf, dass Bewegungsaufgaben und Bauräume in Form von Gelenkpointsrestriktionen mit den CAD eigenen Werkzeugen erzeugt und verändert werden können. Die für die Getriebeauslegung benötigten Daten werden über eine Schnittstelle, im vorliegen-

den Fall von CATIA V5 über die Microsoft-eigene COM-Schnittstelle, an das Auslegungsprogramm übermittelt. Ein Austausch über Dateien auf der Festplatte findet nicht statt. Die Daten in der Auslegungssoftware können bei Änderungen an den Bewegungsaufgaben oder Restriktionen im CAD aktualisiert werden. In diesem Programm muss die Aktualisierung manuell durch den Nutzer gestartet werden. Dies ließe sich aber auch automatisieren, bspw. im einfachsten Fall dadurch, dass das Auslegungsprogramm in regelmäßigen Abständen auf Änderungen im CAD prüft.

Weitere Informationen wie die Gewichtungen der einzelnen Posen oder die Art der Restriktion (Pointset, Polyline oder Polygon), werden bei diesem Auslegungsprogramm manuell vom Nutzer in der Programmoberfläche eingegeben. Hier bestünde aber zum Beispiel die Möglichkeit über im CAD verfügbare Merkmale, wie bspw. verschiedene Farben oder unterschiedliche Linienarten, weitere Informationen direkt im CAD zu hinterlegen und mit in das Auslegungsprogramm zu exportieren.

Die eigentliche Getriebeauslegung in Form der Synthese und Analyse erfolgt außerhalb des CAD. Im Anschluss der Getriebeauslegung bzw. bei jeder Iteration im Getriebeauslegungsprozess, kann der Mechanismus in Form einer Strichkinematik im CAD automatisch neu aufgebaut bzw. aktualisiert werden. Aus dieser Strichkinematik lässt sich automatisch ein animierbares Kinematikmodell (CATIA DMU-Kinematics) aufbauen. Auf diesem Modell assoziativ aufgebaute Konstruktionen würden sich bei einer Aktualisierung der Kinematik im Getriebeauslegungsprogramm an die neue Kinematik anpassen.

#### 3.2 Syntheseprozess

Die implementierten SyntheseprozEDUREN der einzelnen Getriebebausteine verwenden eine einfache erschöpfende Suche. Das heißt, dass für einen Baustein zur Bewertung aller Lösungen alle möglichen Kombinationen von Gelenkpointskandidaten getestet werden, wenn aus jeder der Restriktionen je einer der Kandidaten genommen wird. Die folgende Tabelle soll zum Vergleich der Berechnungszeiten für die unterschiedlichen Bausteine dienen. Die Berechnung ist in Matlab ohne Parallelisierung implementiert und gerechnet wurde auf einem Windows 10 Rechner mit 3,4 GHz-Prozessor. Angegeben ist die Anzahl an Prüfungen von Lösungskombinationen pro Sekunde, bei einer Syntheseaufgabe mit 4, 8 und 12 Posen der zu führenden Körper:

Baustein	4 Posen	8 Posen	12 Posen
R-Kette:	$19 \cdot 10^3$	$14 \cdot 10^3$	$11 \cdot 10^3$
RR-Kette:	$22 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$
RRR-Kette:	$18 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$	$11 \cdot 10^3$
Dreigli.-Gr.:	$8,0 \cdot 10^3$	$4,7 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$

Die erschöpfende Suche bedeutet bspw. im Fall der RR-Kette mit  $m$  Gelenkpointskandidaten in der einen Restriktionen und  $n$  Gelenkpointskandidaten in der anderen Restriktion, dass insgesamt  $m \cdot n$  mögliche RR-Ketten-Lösungen bewertet werden müssen, wenn jeder der  $m$  Kandidaten mit jedem der  $n$  Kandidaten in Kombination getestet wird (vgl. [9]). Für die Bausteine RRR-Kette und Drei-

gliedergruppe steigt die Anzahl der zu prüfenden Kombinationen noch schneller mit der Anzahl der Kandidaten in den Restriktionen, da jeweils Kandidaten aus drei bzw. fünf Restriktionen miteinander kombiniert werden. Somit kann die Anzahl der zu testenden Kombinationen mit zu feiner Rastergröße in den Restriktionen sehr schnell sehr groß werden, was der Hauptnachteil dieser Methode ist.

Als weiterer Nachteil kann gesehen werden, dass die Rangfolge der Lösungen eines Bausteins, für dessen *Input-Tasks* die *Output-Tasks* eines anderen Bausteins verwendet werden, abhängig ist von der Lösung des Bausteins, der die Output-Tasks generiert. Das kann bewirken, dass bei der abschließenden Variation von Lösungen bei der Stapelverarbeitung in der Analyse, bei der für alle Getriebebausteine nochmal unterschiedliche Lösungen gewählt werden können, eigentlich gute Kombinationen von Bausteinen sehr weit unten in der Liste stehen und dadurch unter Umständen nicht betrachtet werden.

Vorteilhaft ist bei der Methode die hohen Flexibilität durch die beliebige Anzahl an Posen, die Steuerung der Lösung durch Gewichtung der einzelnen Posen und durch die Vorgabe von Restriktionen für alle Gelenkpunkte. Durch Betrachtung der großen Anzahl von Lösungen ist es möglich den Lösungsraum durch die Darstellung von Farbverläufen zu visualisieren. Die Farbverläufe ermöglichen dem Nutzer Bereiche mit guten Lösungen zu erkennen und Handlungsempfehlungen abzuleiten in welchen Bereichen außerhalb der Restriktion eventuell besser Lösungen zu erwarten sind.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag präsentiert einen Ansatz zur Mechanismenauslegung der in den CAD-Konstruktionsprozess integriert ist. Die Vorgabe der Bewegungsaufgabe und weiterer geometrischer Restriktionen erfolgt im CAD (hier CATIA V5). Diese Daten werden von einer Auslegungssoftware importiert, in der die eigentliche Synthese stattfindet. Erzeugte Mechanismen werden anschließend automatisch im CAD aufgebaut. Das verwendete Syntheseverfahren ist bausteinbasiert, das heißt komplexere Mechanismen werden aus kleineren Einheiten wie einzelnen Drehgelenken oder RR-Ketten aufgebaut. Die Synthese der einzelnen Bausteine ist optimierungsbasiert und ermöglicht die Vorgabe beliebiger vieler Posen bei gleichzeitiger Vorgabe von erlaubten Bereichen für Gelenkpunkte.

*Das Forschungsprojekt wird durch die Bayerische Forschungsförderung gefördert und erfolgt in Kooperation des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (MiMed) der Technischen Universität München, der BMW AG und der Webasto Convertibles GmbH.*

## 5 Literatur

[1] Breiffeld, C.: *GENESYS – Architektur und Kernrealisierung eines Softwaresystems zur Entwicklung ungleichmäßig übersetzender Getriebe*. Fortschr.-Ber.

VDI Reihe 1 Nr. 257, VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)

[2] Strauchmann, H.: APPROX für Windows. <https://www2.htw-dresden.de/~hstrauchm/approx/> (aufgerufen am 10.02.2020)

[3] info-key GmbH & Co. KG: [asom.eu/de/produkte/asom-v7/](http://asom.eu/de/produkte/asom-v7/) (aufgerufen am 26.11.2019)

[4] Dassault Systèmes: [www.solidworks.com/partner-product/mechanism-generator](http://www.solidworks.com/partner-product/mechanism-generator) (aufgerufen am 26.11.2019)

[5] Corves, B.; Müller M.; Hüsing, M.; Beckermann, A.: *Analyse von Kurvengetrieben in MechDev*. 13. Kolloquium Getriebetechnik, Dortmund (2019).

[6] ARTAS - Engineering Software: *SAM 8.0 - The ultimate mechanism designer*. Produkthandbuch (2019).

[7] Abdul-Sater, K.; Irlinger, F; Lueth, T. C.: *CAD-integrierte, kinematische Auslegung ebener Gelenkgetriebe*. 16. VDI-Getriebetagung Bewegungstechnik, Nürtingen (2012).

[8] Zumpe, V.; Müller, M.; Abdul-Sater, K.; Lüth, T.; Hüsing, M.; Corves, B.: *CAD integrierte Mehrposen-Maßsynthese und Optimierung sechsgliedriger, ebener Führungsgetriebe mit MATLAB*. 12. Koll. Getriebetechnik, Dresden (2017)

[9] Laudahn, S.; Irlinger, F.; Abdul-Sater, K.: *A flexible discrete building block synthesis approach as basis for the design of planar linkages*. ASME IDETC2017, Cleveland, Ohio, 06.08.-09.08. (2017)

[10] Abel, T.: Ein Beitrag zur Struktur- und Maßsynthese mehrgliedriger ebener Kurbelgetriebe zur Erfüllung antriebsbezogener allgemeiner und spezieller Gliedlagen. Dissertation, RWTH Aachen (1985)

[11] Schreiber, H.: Maßsynthese ebener Kurbelgetriebe durch Kreispunktsuche und Homotopieverfahren. Dissertation, RWTH Aachen (1999)

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

**In: Sechste IFToMM D-A-CH Konferenz 2020**

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/71207

**URN:** urn:nbn:de:hbz:464-20200221-100229-2



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-SA 4.0) genutzt werden.