Einsatz des Mathcad E-Books „MATHTOOL“ zur Lösung antriebstechnischer Aufgabenstellungen

Prof. Dr.-Ing. M. Berger, Dipl.-Ing. A. Heine, Dr.-Ing. J. Matthes

Kurzfassung

Dem Konstrukteur und Entwickler stehen heute umfangreiche Hilfsmittel zur Lösung von antriebstechnischen Aufgabenstellungen zur Verfügung. Neben zahlreichen MKS-Systemen die zur Auslegung von Antriebslösungen zur Verfügung stehen, eignen sich in den frühen Entwurfsphasen der Mechanismensynthese und –analyse kommerzielle Computeralgebrasysteme wie Mathcad. Um dieses allgemeine Berechnungsprogramm an die eigenen Bedürfnisse anzupassen, kann auf ein so genanntes Elektronisches Handbuch (E-Book) zurückgegriffen werden. Die Erzeugung und Funktionsweise eines solchen E-Books werden in den ersten Kapiteln schrittweise präsentiert.

Der Beitrag zeigt im Weiteren, welche Auslegungs- und Berechnungsschritte mit Hilfe einer für Mathcad implementierten und modular aufgebauten Toolbox „MATHTOOL“ sehr effizient bearbeitet werden können. Unter dem Blickwinkel, dass heutige Mechanismen neben einem optimalen kinematischen Aufbau auch ein oder mehrere Aktuatoren besitzen können, sind in dieser Toolbox unterschiedlichste Bausteine für die Synthese, kinematische und kinetostatische Analyse bis hin zur Gestaltung von Antriebsfunktionen zusammengefasst.

Die praktische Nutzung des E-Books wird durch eine erweiterbare Beispielsammlung unterstützt. Aufbauend auf den bekannten „Drag & Drop“-Systemfunktionalitäten können die Datenblätter dieser Bibliothek direkt als Vorlage für eigene Projekte dienen und in ein neues Arbeitsblatt mit veränderlichen Eingabeparametern und Modulen übernommen werden. Die Anwendung des E-Books in Lehre und Forschung wird anhand unterschiedlicher Beispiele gezeigt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt in der durchgängigen Berechnung und Simulation, wobei ausgehend von den Anforderungen hinsichtlich des Bewegungsdesigns eine optimale Ermittlung der Antriebsfunktionen, z. B. für Servomotoren, erfolgt.

Der Textteil versteht sich als Ergänzung zu den im Anhang befindlichen Folien des Vortrags. In einigen Abschnitten wird direkt bezug auf die Darstellungen des Vortrags genommen.

1 Einleitung

Für viele Aufgabenstellungen der Mechanismenentwicklung gibt es nicht immer genau eine passende und preiswerte Softwareapplikation. Die Lösungsfindung kann in diesem Fall durch den Einsatz kommerzieller Berechnungssoftware erreicht werden, wobei die Effizienz der Arbeitsweise vor allem durch aufgabenspezifisch vorgefertigte Funktionsbausteine bestimmt wird. Sind diese modular strukturiert und einfach handhabbar, ist die Gestaltung komplexer Algorithmen auch für umfangreiche Aufgabenstellungen in kurzer Zeit möglich. Um den Wartungsaufwand zu minimieren, sollte das erstellte Arbeitsblatt auch gleichzeitig als Berechnungsdokumentation mit bekannter mathematischer Syntax dienen.
Unter diesen Gesichtspunkten stellt das kommerzielle Programm Mathcad der Fa. PTC eine komfortable Lösung zur Erstellung und Dokumentation von Berechnungen im Ingenieurwesen dar. Die realmathematische Notation der Mathcad-Arbeitsblätter erfüllt bestens die nach DIN ISO 9001-Zertifizierung geforderte Nachvollziehbarkeit zur Dokumentation von berechnungsintensiven Abläufen und Prozessen.
Betrachtet man nochmals die Vorteile des Einsatzes eines kommerziellen Softwareproduktes, so ist vor allem die Konsistenz in der Weiterentwicklung und Anpassung an neue Betriebssystemumgebungen neben der Wartung und dem Support zu nennen. Diese Anforderungen erfüllt ein im universitären Umfeld erstelltes Softwareprodukt oftmals nur bedingt. Der Weg, die vielfältigen Ergebnisse aus den F&E Aktivitäten als aufgabenspezifische Funktionsbausteine abzubilden und damit die Softwarefunktionalität zielgerichtet zu ergänzen, erscheint daher sehr sinnvoll.

2 Schritte zum eigenen E-Book

Aufbau und Eigenschaften eines E-Books

Nachschlagewerke und Kataloge sind häufig verwendete Hilfsmittel zur Lösung von ingenieurtechnischen Aufgaben. Ein sog. Elektronisches Handbuch (E-Book) ist prinzipiell eine geordnete Sammlung von Mathcad-Dokumenten, die Suchfunktionen, Querverweise und Hyperlinks enthält. Befindet sich eine spezifische Indexdatei und alle weiteren Dokumente des E-Books im Handbuchverzeichnis von Mathcad, so werden diese sofort in der Symbolleiste Ressourcen der Mathcad-Menüoberfläche und im Menü Hilfe unter E-Books aufgeführt. Beim Öffnen eines E-Books wird dessen Inhalt in einem eigenen Ressourcenfenster, welches auch für die Darstellung der Hilfe verwendet wird, angezeigt. Die Arbeit mit dem E-Book bietet folgende Vorteile:

Jede Seite des Ressourcenfensters ist ein dynamisches Arbeitsblatt, in dem z. B. Werte und Gleichungen direkt berechnet werden.
Es können Daten und Formeln mittels Drag & Drop in das aktuelle Mathcad-Arbeitsblatt eingefügt werden.
Im Buch kann man seitenweise und durch Klicken auf Verknüpfungen navigieren.
In einem zugeordneten Indexverzeichnis ist die gezielte Begriffsauswahl möglich.
Das gesamte E-Book unterstützt die Suche nach Textelementen.
Es können Änderungen vorgenommen und diese als Anmerkungen gespeichert werden.
Die Idee des E-Books ist nicht neu, und gerade für Mathcad Anwender existieren bereits eine Reihe von E-Books. Neben den frei verfügbaren E-Books gibt es auch kommerzielle Erweiterungsbibliotheken, wie z. B. Mathcad Extension Pack „Data Analysis“ oder Mathcad Bibliothek für Maschinenbau.

Entwicklung eines E-Books

Die E-Book-Technik lässt sich auch als ein Publikations- und Verteilungsmedium betrachten. E-Books ermöglichen es, auf einfache Art verwandte Dokumente entweder für den eigenen Gebrauch oder zum Verteilen an andere Personen in einer Organisation oder Gemeinschaft zu sammeln.
Zum Anfertigen eines eigenen E-Books können als Vorlage die QuickSheets in Mathcad oder E-Books aus der Mathcad-Web-Bibliothek verwendet werden. Es sind mehrere Schritte zum Erstellen eines E-Books erforderlich. Diese werden in der Author's Reference (Autoren-referenz) unter Help (Hilfe) beschrieben und nachfolgend kurz aufgeführt:

- Erstellen einzelner Mathcad-Dateien,
- Vorbereiten eines Inhaltsverzeichnisses,
- Hinzufügen von Hyperlinks zwischen geeigneten Dateien,
- Erstellen einer HBK-Datei zur Festlegung der Reihenfolge für die Dateien in dem Buch und
- Erstellen eines Indexes (optional).

Eine Kontrollfunktion ermöglicht es, das E-Book auf Fehler zu überprüfen und eine Index-Datei zu erstellen. Beispielhaft wird in den Folien 5-7 der Entwurf eines E-Books erläutert.

3 MATHTOOL- Konzept

Ausgehend von den in Mathcad vordefinierten Grundfunktionen und Programmfeatures besteht der Anspruch des MATHTOOL-Konzeptes darin, einige aus der Hochsprachenprogrammierung bekannte Vorgehensweisen zu übernehmen. Dazu ist es erforderlich, strukturierte Arbeitsblätter zu erstellen und häufig verwendete Funktionen in Unterprogrammen zu gliedern. Die in einer Toolbox bereitgestellten Berechnungsmodule (Unterprogramme) sind in 6 Themenbereiche aufgeteilt. Die **Analyse-Toolbox (A-TB)** umfasst neben den aus der VDI 2729 [3] bekannten Modulen noch drei Module zur Berechnung von Rädergruppen, ein Antriebsmodul für Hubzylinder und Module zur Ausgabe der Ergebnisse in benutzerdefinierten Einheiten. Bild 1 zeigt einen Gesamtüberblick der MATHTOOL Funktionalitäten. Ausführliche Beschreibung ist unter [1, 2] nachzulesen.

Für viele praktische Aufgabenstellungen der Getriebeanalyse und –synthese zeigen auch heute noch die klassisch-zeichnerischen Verfahren sehr schnelle und in zahlreichen Veröffentlichungen umfassend dokumentierte Lösungswege. Für den Fall einer numerischen Problembearbeitung erscheint es sinnvoll, grundlegende und im Lösungsalgorithmus oft wiederkehrende geometrische Operationen in Form von Funktionen oder Unterprogrammen vorzudefinieren. Unter diesem Gesichtspunkt wurden die wichtigsten Funktionen der ebenen analytischen Geometrie in der **Geometrie-Toolbox (G-TB)** implementiert. Mit Hilfe dieser Funktionen ist es möglich, sowohl Analyse- als auch Syntheseprobleme basierend auf den bekannten grafischen Lösungsalgorithmen zu bearbeiten.

Die zur Unterstützung der Synthese ebener Getriebe erforderlichen Module sind in einer eigenen **Synthese-Toolbox** (**S-TB**) zusammengefasst. Das erarbeitete Konzept mit ersten Beispielen wurde in [4] bereits vorgestellt. Die G-TB wurde hierbei durch einige geometrische Grundfunktionen für Syntheseaufgaben erweitert.

Aufgrund der Einschränkung der in der A-TB verwendeten Modulmethode auf Getriebe mit einfachen Gliedergruppen wurden Algorithmen zur Analyse von Getrieben mit höheren Gliedergruppen erarbeitet und in einer eigenständigen „**Höhere Gliedergruppen-Toolbox** (**H-TB**)“ implementiert. Aktuell sind Berechnungen der Gliedergruppen III und IV mit einem und zwei Schubgelenken möglich.

Die **Kinetostatik-Toolbox** (**K-TB**) basiert auf Algorithmen zur kinetostatischen Analyse von Koppelgetrieben und Rädergruppen, welche Anfang der 90er Jahre am Institut für Getriebetechnik Hannover entwickelt und sehr erfolgreich im Programm KAMOS [5] unter MS DOS implementiert wurden. Die darin enthaltenen Lehrbeispiele sind auch in der Getriebebibliothek enthalten.

Die **Bewegungsdesign-Toolbox** (**B-TB**) zur Berechnung beliebiger Antriebs- und Bewegungsfunktionen wurde im letzten Jahr mit dem gesamten Umfang an Bewegungsgesetzen aus der VDI 2143 [6] erweitert.
Das Modul-Konzept zur Getriebeanalyse und –synthese zeigen die Folien 8-10.

4 Elektronisches Handbuch zur Getriebeauslegung (Getriebebibliothek)

4.1 Eigenschaften und Aufbau der Getriebebibliothek

Das E-Book zur Auslegung ebener ungleichmäßig übersetzender Getriebe (uüG) wurde als „Getriebebibliothek“ benannt und basiert auf den Modulen von MATHTOOL. Der Fokus ist hierbei auf eine beliebig erweiterbare Getriebebibliothek gerichtet, welche als Nachschlagewerk dient und erste Lösungsbeispiele als Referenzen enthält. Bezüglich der Ausbildung gibt diese einen Überblick sowie Hilfestellungen für die numerische Bearbeitung getriebe- und antriebstechnischer Aufgaben und unterstützt die Studenten bei der Anwendung der Berechnungsmethoden im Umfeld der Getriebeanalyse und -synthese. Ebenso bildet das E-Book einen Pool für vordefinierte Grundaufgaben und dient als Beispielsammlung für bearbeitete Projekte. Neben den dokumentierten Grundmodulen wird der Nutzer bei Bedarf durch viele zusätzliche Informationen über die jeweiligen Programmerfordernisse und Berechnungsverfahren unterstützt.

Im Gegensatz zu vielen kommerziellen MKS-Programmen, die durchaus kinematische oder auch dynamische Simulationen ohne Spezialwissen über Struktureigenschaften oder Berechnungsmethoden erlauben, setzt die Anwendung von MATHTOOL fundierte Kenntnisse auf diesen Gebieten voraus. Dazu zählen u. a. die Zerlegung von Getrieben in Gliedergruppen, die Definition von Bewegungsaufgaben oder die Methoden zur Gelenkkraftanalyse. Sind diese Grundlagen noch nicht ausreichend vorhanden, so kann die Getriebebibliothek mit den enthaltenen ausführlichen Beispielen auch zur Wissensvermittlung dienen. Andernfalls können versierte Anwender in sehr kurzer Zeit komplexe antriebstechnische Aufgaben durch den schnellen Zugriff auf die entsprechenden Funktionsmodule und vorgefertigten Algorithmen lösen.

Trotz dieser erweiterten theoretischen Anforderungen ist die Nutzung der Getriebebibliothek vor allem im industriellen Einsatz vor dem Hintergrund der Sicherung hoher Qualitätsstan-

dards, wie sie z. B. zur Zertifizierung nach DIN ISO 9001 verlangt werden, interessant. Ausgeführte Berechnungen sind klar dokumentiert und könnten in einer Abteilung zentral nach Projekten geordnet zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus ist es vor allem für Softwareentwickler interessant, ihre in einer Hochsprache zu programmierenden Algorithmen vorher mit einem solchen Programm zu optimieren und gleichzeitig in einer allgemein lesbaren Form für spätere Wartungszwecke zu dokumentieren.
Folie 11 zeigt die Eingangsseite mit Inhaltsverzeichnis des E-Books „Getriebebibliothek“.

Derzeitig enthält die Getriebebibliothek Arbeitsblätter zur kinematischen und kinetostatischen Analyse von vier- bis achtgliedrigen Koppelgetrieben, Kurvengetrieben und kombinierten Getrieben. Hinzu kommen Arbeitsblätter zur Durchführung der Lagensynthese für 3, 4 und 5 vorgegebene Ebenenlagen. Diese können separat in Mathcad ausgeführt oder über die Mathcad-Analyse Schnittstelle von Pro/Engineer aufgerufen werden (Folie 13). Diese ermöglichen die Getriebesynthese und lassen sich mit der Berechnung gebräuchlicher Antriebsfunktionen kombinieren. Neben den Beispielaufgaben aus der Vorlesung und der Übung zur Lehrveranstaltung Getriebetechnik wurden auch ausgewählte Praxisbeispiele integriert. Die in Folie 12 dargestellte Eingangsseite enthält die thematische Untergliederung des E-Books. Der Nutzer kann von hier aus direkt in eine gewünschte Rubrik, wie z. B. die Getriebeanalyse (Kinematik, Kinetostatik) oder die Sammlung von Praxisbeispielen, gelangen bzw. die Toolbox selbst oder die enthaltenen Hilfsblätter anwählen. Die Verzeichnisstruktur des E-Books enthält neben den Arbeitsblättern der Beispiele sowie der Toolbox MATHTOOL auch Layout-Vorlagen, Bilder und Skizzen.

4.2 Die Arbeitsblätter der Getriebebibliothek

Im E-Book sind bereits unterschiedliche aufgabenspezifische Vorlagen für neue Arbeitsblätter enthalten. Diese vereinfachen die Anwendung und dienen gleichzeitig einer ablaufoptimierten Darstellung von unterschiedlichen Lehrinhalten und Beispielen.

Ein Toolbox-Arbeitsblatt enthält neben dem Versionshinweis eine Modul-Übersicht und den jeweiligen Funktionsaufruf. Jedem Funktionsaufruf folgen in verdeckten Bereichen die Beschreibung des Moduls und dessen Programmcode sowie ein Zahlenbeispiel. Die Beschreibung eines Moduls orientiert sich an der in der VDI 2729 [4] festgelegten Form. Diese enthält neben einer Skizze mit der Darstellung aller Ein- und Ausgabeparameter einen Beschreibungstext und eine Liste der Parameter und deren Format.

In den Aufgabenblättern zur Darstellung grafischer Verfahren, insbesondere unter Verwendung der G-TB im Formularformat, wird der Benutzer nicht durch die Berechnung geführt. Hier sind die Werteingabe und Ergebnisdarstellung direkt gekoppelt, da sich diese Vorgehensweise für die Erklärung der zeichnerischen Verfahren besonders eignet. Folien 14-21 zeigen an dem Beispiel Sauggreifergetriebe die Arbeitsweise zum Erstellen eines solchen Arbeitsblattes.
Spezifisch sind die gelb hinterlegten Variablendeklarationen, in denen eigene Zahlenwerte übergeben werden. Die Ausgabe der Ergebnisse folgt in grün hinterlegten Bereichen. Neben Modulen lassen sich auch Diagramme und die Funktionen zur Darstellung der Grafiken (Getriebeschema) kopieren. Der Bewegungsablauf des Getriebes kann dann auch durch eine Animation dargestellt werden.

Arbeitsblätter, deren Schwerpunkt in der rechnerischen Analyse liegen, werden mit der universellen Vorlage „Numerik-Arbeitsblatt“ erstellt. Dieses enthält, in der als Trennlinie zwischen Arbeitsblattkopf und restlichem Dokument dargestellten Region, den Verweis auf die verwendete Toolbox. Im Anschluss werden ggf. die Aufgabenstellung, die gegebenen Größen und das kinematische Schema auf der Anfangsseite zusammengefasst. „Numerik Arbeitsblätter“ können insbesondere durch den Einsatz von Steuerelementen wie Buttons, Listen und Schiebereglern zum Verändern von Parametern, zur Steuerung des Berechnungsablaufs bzw. der Ausgabe effektiv gestaltet werden.

4.3 Standards zur Definition von Antriebsfunktionen

Mit den Möglichkeiten der Steuerungs- und Regelungstechnik sowie leistungsfähiger Servoantriebe lassen sich heute nahezu beliebige Bewegungsfunktionen erzeugen. Die dazu notwendigen Funktionsbausteine zur Erzeugung einer sog. elektronischen Kurvenscheibe haben viele Steuerungsanbieter in ihrem Programm. Die damit bereitgestellten Funktionalitäten erlauben es, auch mehrere Antriebe mit sog. Motion-Control–Systemen zu kombinieren. Die Antriebsfunktionen werden in Abhängigkeit einer realen oder virtuellen Masterachse als eindimensionale Funktion ermittelt.
Die B-TB dient zur Beschreibung von Bewegungsaufgaben und der Ausgabe einer Bewegungsfunktion für den Antrieb. Vorteilhaft sind der jederzeit erweiterbare Funktionsumfang und die individuellen Eingriffsmöglichkeiten. Es werden neben den aus der VDI 2143 [6] bekannten Bewegungsgesetzen für Kurvengetriebe angewandt auch erweiterte Funktionen bereitgestellt.

Die Struktur der B-TB orientiert sich an zwei grundlegenden Vorgehensweisen, dem automatischen Ablauf und der Aneinanderreihung von Modulen. Für den automatischen Ablauf wurde ein umfassendes Berechnungsmodul entwickelt, das die Verknüpfung der Bewegungsabschnitte herstellt sowie den Berechnungsablauf zur Ermittlung der Bewegungsfunktion durchführt. Auf dieses Berechnungsmodul kann aber auch verzichtet werden, wenn die Auswertung der Eingabedaten und die Aneinanderreihung der Bewegungsgesetz-Module selbstständig, nach der bekannten Verfahrensweise der Modulmethode, erfolgt. Zudem ist die B-TB so konzipiert, dass jederzeit neue Bewegungsgesetze unter Beachtung der Syntax ergänzt werden können, wobei neben den einheitlichen Basiswerten auch spezielle Parameter, wie z. B. eine Wendepunktverschiebung oder geteilte Funktionen, Beachtung finden. So erlaubt die Toolbox auch versierten Anwendern jederzeit, den Ablauf der Berechnung zu überwachen und ggf. direkt anzupassen.
Als Ausgangspunkt der Berechnung stehen dem Anwender drei Möglichkeiten zur Eingabe der Stützpunktdaten für die Bewegungsaufgabe zur Verfügung:

- die Verwendung eines Excel-Formulars,
- die Definition im Eingabebereich des Mathcad-Arbeitsblattes und
- das Einlesen einer Wertetabelle als Punktdatei.

Wird ein Bewegungsverlauf allein durch eine große Anzahl von Stützstellen definiert oder will man auf die Vorgabe spezieller Bewegungsgesetze verzichten, kann eine Spline-Funktion bzw. eine Polynomoptimierung eingesetzt werden [7]. Zudem lässt sich mit dem Modul „Fourier“ unter Vorgabe gleichmäßig verteilter Punktkoordinaten und der Anzahl Harmonischer die Fourier-Reihe entwickeln.

Die B-TB bildet im weitesten Sinne den klassischen Berechnungsansatz ab, der die Gestaltung eines auszuführenden Bewegungsablaufs durch das Einfügen von Übergangsabschnitten zwischen mehr oder weniger fest vorgegebenen Randwerten vorsieht. Erfolgt diese Bewegungsgestaltung durch grafisch interaktive Methoden, wird dafür der Begriff Bewegungsdesign verwendet. Während beim klassischen Ansatz eine Optimierung oftmals nur durch die bestmögliche Auswahl eines nach seinen Kennwerten günstigen Bewegungsgesetzes für die einzelnen Übergangsabschnitte erfolgen kann, eröffnen sich durch den Einsatz der Software MOCAD (Folie 26) zusätzliche Möglichkeiten zur interaktiven und u. U. auch intuitiv gesteuerten Variation von Stützwerten [8]. Die in dieser Software enthaltenen Bewegungsgesetze wurden alle mit der B-TB getestet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Getriebebibliothek als E-Book bildet eine effektive Basis für vielfältige Untersuchungen der Analyse und Synthese von Mechanismen sowie der Gestaltung von Antriebsfunktionen. Durch ihren modularen Charakter ist sie mit neuen Funktionalitäten und eigenen Beispielen beliebig erweiterbar. Die Gestaltung der Arbeitsblätter und Hilfetexte unterstützt ihren Einsatz in der Lehre und Weiterbildung. Für industrielle Anwender können sehr schnell problembezogene Bibliotheken auf der Basis von MATHTOOL erstellt und auf die konkrete Aufgabenstellung abgestimmt werden. Die Projektdokumentation ist dabei bereits Teil der Problembearbeitung und führt bei qualitätsbezogener Arbeitsweise zu keinem zusätzlichen Zeitaufwand.

Unter dem Blickwinkel der Gestaltung optimaler Antriebsfunktionen für Servoantriebe stellt die Bewegungsdesign-Toolbox einen einfach zu bedienenden und frei erweiterbaren Funktionsumfang bereit. Weiterführend sind neben weiteren Bewegungsgesetzen vor allem neue Module zur Auswertung von Kennwerten und der daraus abgeleiteten automatischen Auswahl einer optimalen Antriebskonfiguration denkbar.

6 Literatur

[1] Berger, M., Dög, M., Matthes, J.: MathCAD-Toolbox als hilfreiches Werkzeug zur Synthese und Analyse von Mechanismen. VDI Berichte 1845 (2004)

[2] Berger, M., Matthes, J.: Toolbox zur effizienten Lösung antriebs- und getriebetechnischer Aufgabenstellungen mit MathCAD©. 6.Kolloquium Getriebetechnik, Verlagshaus Mainz, Aachen 2005

[3] VDI Richtlinie 2729: Modulare kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1995

[4] Berger, M., Dög, M., Matthes, J.: MathCAD-Toolbox als hilfreiches Werkzeug zur Synthese und Analyse von Mechanismen. VDI Berichte 1845 (2004)

[5] Braune, R.: KAMOS-Programmsystem zur Analyse ebener Koppelgetriebe auf PC-Basis. Programmbeschreibung, Institut für Getriebetechnik, UNI Hannover 1990

[6] VDI-Richtlinie 2143: Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1980

[7] Schönherr, J.: Cam Motion Synthesis for Mixed Motion Constraints using Well – Behaved Polynomials of High Order. Proceedings of the ASME Mechanisms Conference Irvine Cal., 1996

[8] Berger, M.; Heine, A.; Matthes, J.; Schulz, R.: Bewegungsdesign – Das effiziente Werkzeug zur Berechnung und Simulation von Servoantriebssystemen und Kurvengetrieben, 20. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, 28.10. - 29.10.2009, Scientific Reports IWKM 2009 Nr.5, S.54 - 57,

Einsatz des Mathcad E-Books „MATHTOOL“ zur Lösung antriebstechnischer Aufgabenstellungen

Referent: Dr.-Ing. J. Matthes

Co-Autoren: Prof. Dr.-Ing. M. Berger, Dipl.-Ing. A. Heine

Technische Universität Chemnitz
Institut für Fertigungstechnik / Schweißtechnik
Professur Montage- und Handhabungstechnik
Technische Universität Chemnitz
09107 Chemnitz

URL: www.tu-chemnitz.de/mb/MHT

Agenda

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

1 Einleitung

2 Schritte zum eigenen E-Book

3 MATHTOOL – Konzept

4 Elektronisches Handbuch zur Getriebeauslegung

5 Anwendung des E-Books am Beispiel Sauggreifergetriebe einer Druckmaschine

6 Anwendungsbeispiel ABB - Berechnung von Schaltanlagen

7 Zusammenfassung / Ausblick

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

1 Einleitung

Was ist ein Mathcad E-Book?

- geordnete Sammlung von Mathcad-Dokumenten, die Suchfunktionen, Querverweise und Hyperlinks enthält

Wie ermöglicht man den Zugriff?

- Zugriff in Benutzeroberfläche über Symbolleiste Ressourcen und im Menü Hilfe
- Ablage der installierten E-Books im Handbuchverzeichnis (Mathcad Ordner)
- Jedes E-Book wird in einem eigenen Ressourcenfenster geöffnet.

Eigenschaften eines E-Book

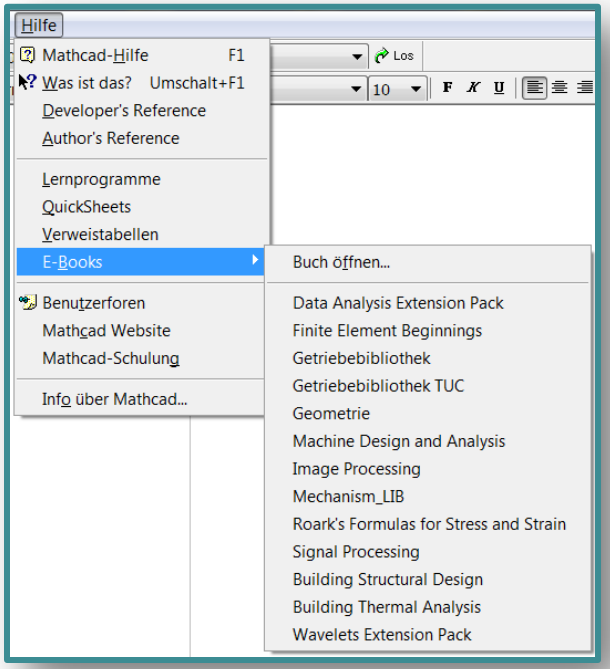
- Jede Seite stellt ein dynamisches Arbeitsblatt dar (Berechnungen werden durchgeführt).
- Daten und Formeln aus E-Book lassen sich kopieren und in Mathcad-Arbeitsblätter einfügen
- Navigation erfolgt innerhalb des E-Books mit den Pfeiltasten in der Symbolleiste oder durch Verknüpfungen innerhalb des Buches
- Index ierung ermöglicht Suchfunktion
- Änderungen lassen sich vornehmen und als Anmerkungen speichern

1 Einleitung

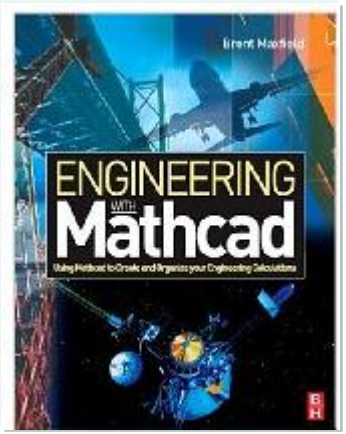
TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

Einige kommerzielle E-Books:

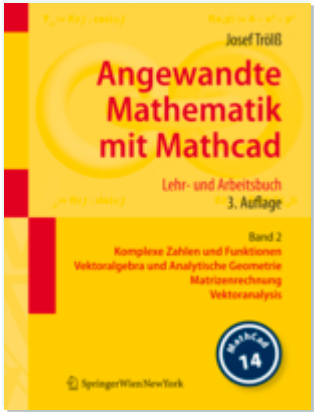
- Mathcad Extension Pack „Data Analysis“
- Mathcad Extension Pack "Signal Processing„
- Mathcad Bibliothek für Bauingenieure
- Mathcad Bibliothek für Maschinenbau - aufbauend auf dem "Standard Handbook of Engineering Calculations" (herausgegeben von Tyler G. Hicks)
- Mathcad Bibliothek für Elektrotechnik



Mathcad Ressourcen-Center: Books



Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations
by Brent Maxfield.



Angewandte Mathematik mit Mathcad. Lehr- und Arbeitsbuch. 4 Bände
Trölß, Josef

2 Schritte zum eigenen E-Book

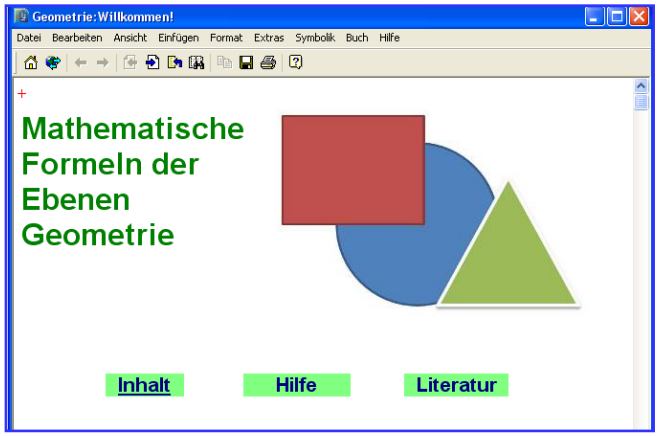
TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

Erstellen eigener E-Books

- Idee: E-Book als Publikations- und Verteilungsmedium
- Sammlung, ähnlicher Dokumente für den eigenen Gebrauch oder zum Verteilen
- Vorlage: QuickSheets in Mathcad

Es sind mehrere Schritte zum Erstellen eines E-Books erforderlich. Diese Schritte werden in der Author's Reference (Autorenreferenz) unter Help (Hilfe) beschrieben.

Eingangsseite des Demo E-Books „Geometrie“



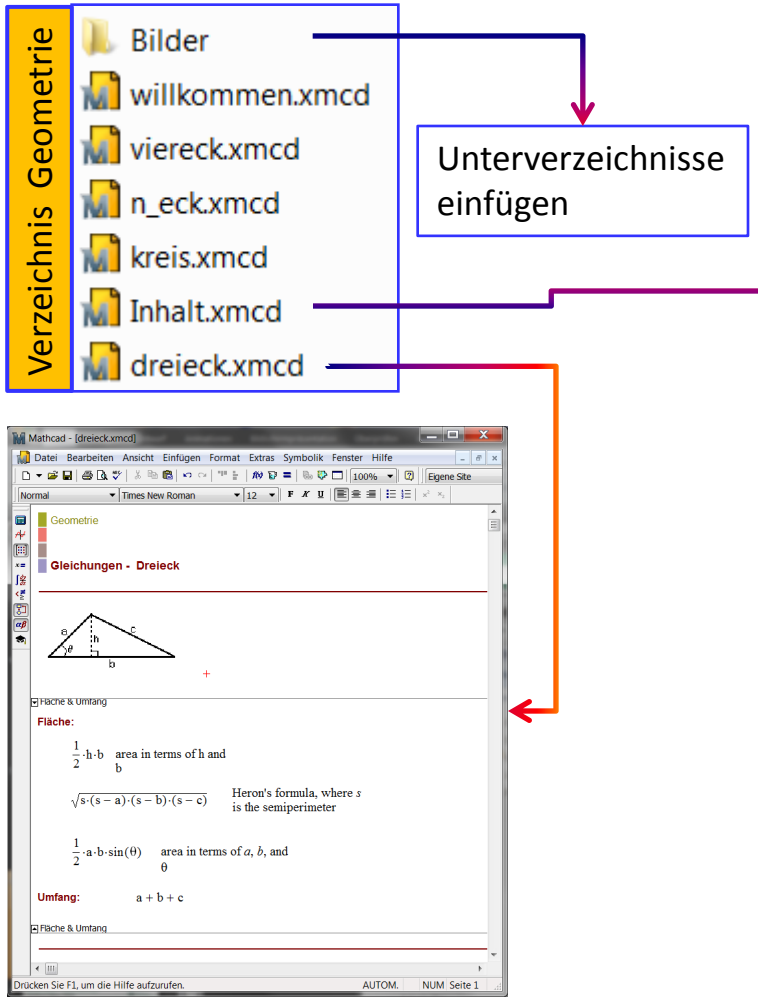
Schritte

- Erstellen einzelner Mathcad-Dateien
- Vorbereiten eines Inhaltsverzeichnisses
- Hinzufügen von Hyperlinks zwischen geeigneten Dateien
- Erstellen einer HBK-Datei zur Festlegung der Reihenfolge für die Dateien in dem Buch
- Erstellen eines Indexes (optional)
- Überprüfen des Indexes, der HBK-Datei und der Arbeitsblätter auf Fehler

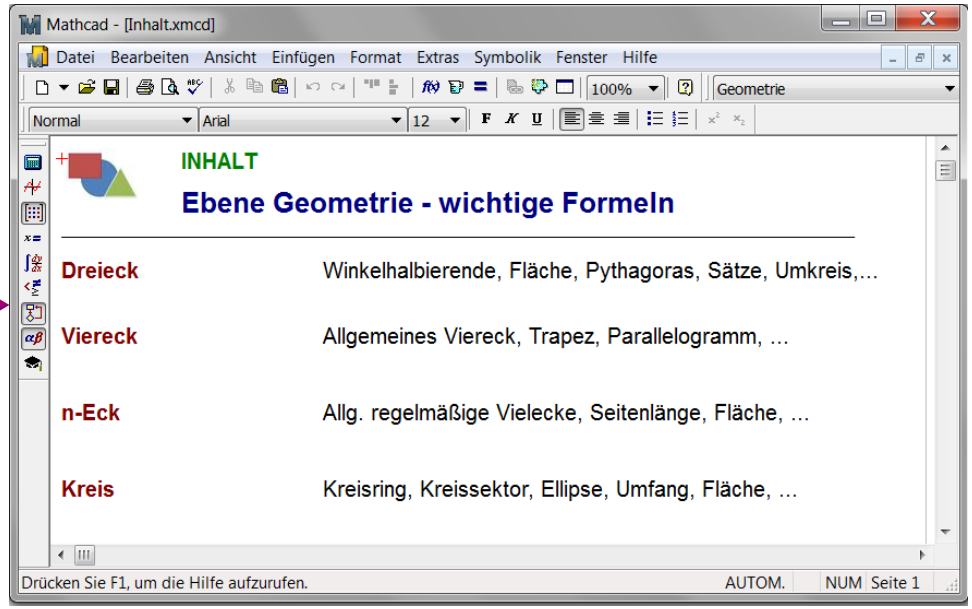
Antriebslösungen mit Mathcad E-Book „MATHTOOL“

2 Schritte zum eigenen E-Book

Erstellen einzelner Mathcad-Dateien



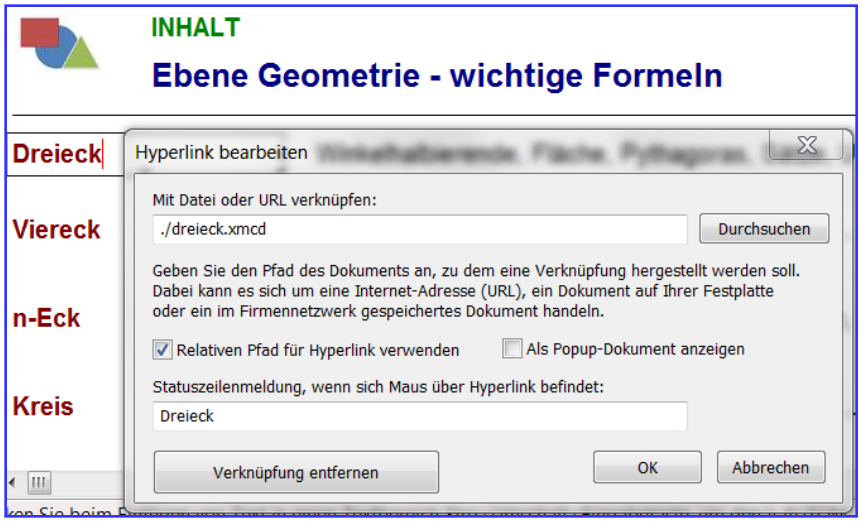
Vorbereiten eines Inhaltsverzeichnisses



- Mathcad Datei ohne Berechnungen
-Texte oder Bilder verwenden
- Erläuterungen einfügen

2 Schritte zum eigenen E-Book

Hinzufügen von Hyperlinks



- Verknüpfung erstellen
- Relativen Pfad einstellen!

→ Installation auf anderen Rechner

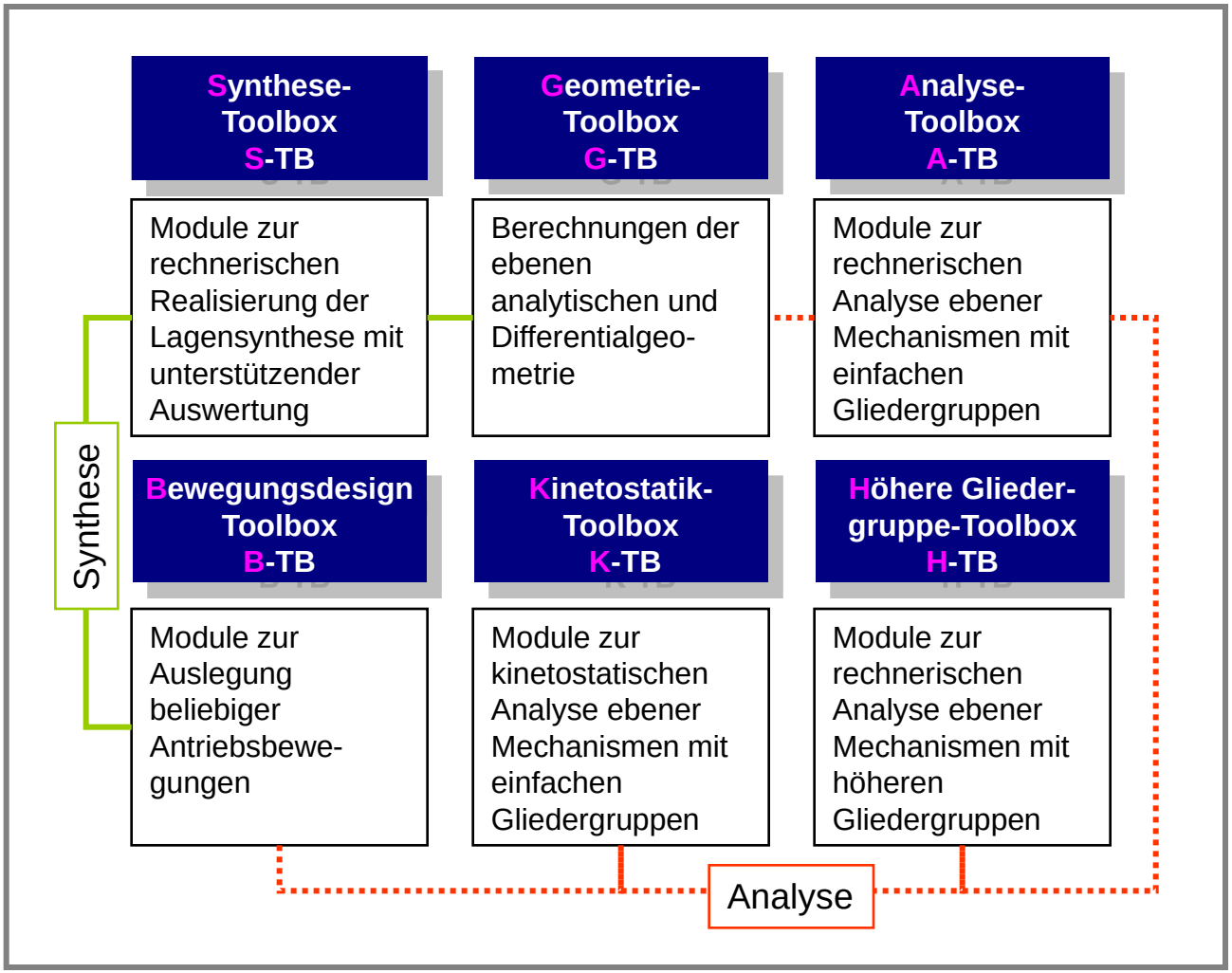
Erstellen einer HBK-Datei

```
;Dieses E-Book stellt Formeln zur Berechnung von
Problemen der ebenen Geometrie bereit
;
.version 13
.title Geometrie
.path Geometrie
;
SPLASH      willkommen.xmcd          :Willkommen!
TOC         Inhalt.xmcd              :Inhalt
;
;
Dreiecke    dreieck.xmcd  : Flächen, Winkel, Seiten
;
Vierecke    viereck.xmcd  : Umfang, Fläche, Schwerpunkt
;
N_Eck       n_eck.xmcd    : Regelmäßige N-Ecke
;
Kreis       kreis.xmcd    : kreisförmige Objekte
```

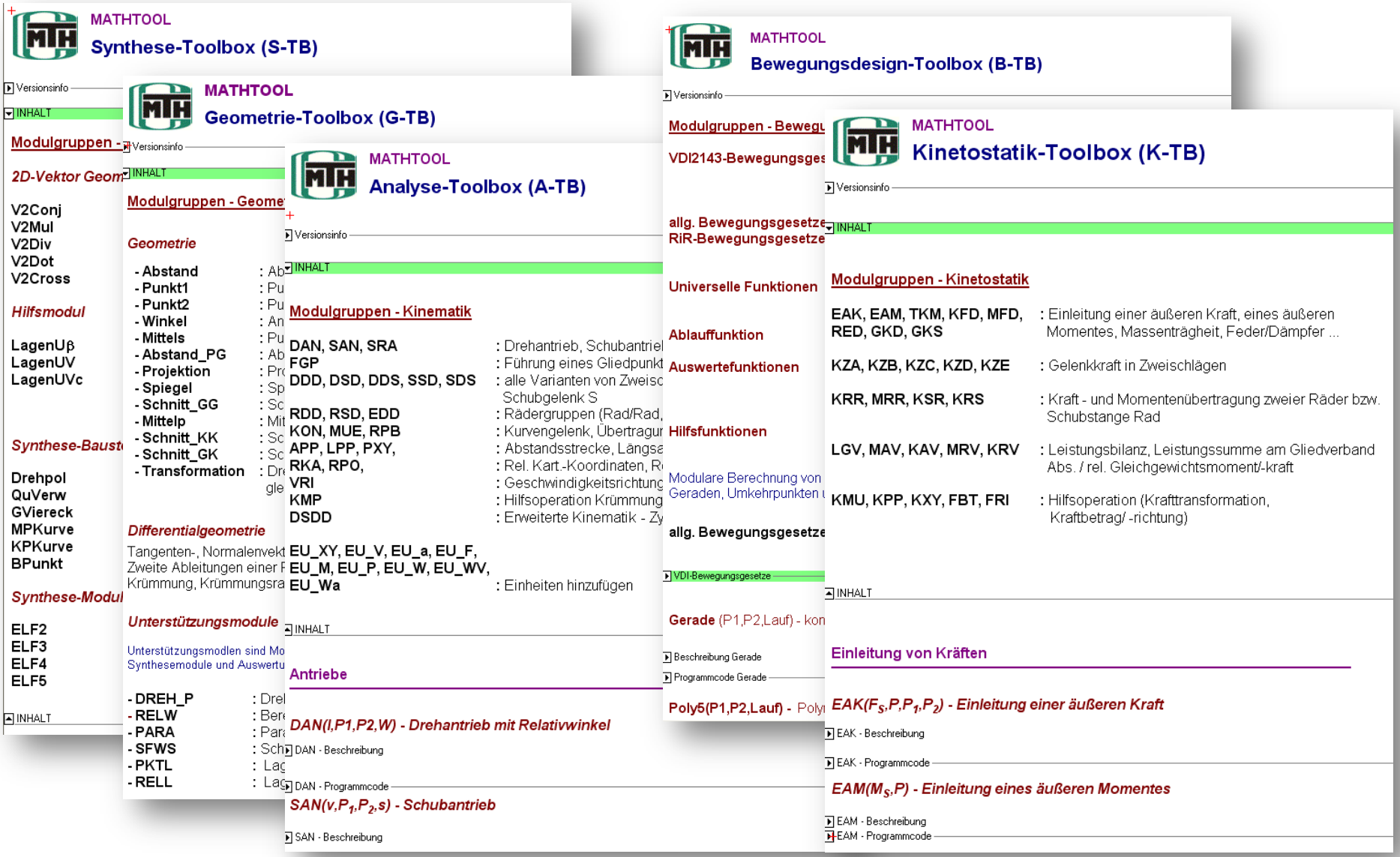
- Erstellen eines Indexes (optional)
- Überprüfen des Indexes, der HBK-Datei und der Arbeitsblätter auf Fehler

3 MATHTOOL - Konzept

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik



3 MATHTOOL - Konzept



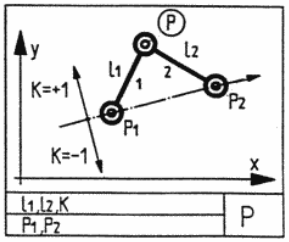
3 MATHTOOL - Konzept

A-TB : Modul DDD - Beschreibung

DDD(S_1,S_2,K,P_1,P_2) - Zweischlag mit drei Drehgelenken

] DDD - Beschreibung

Sinnbild:



Beschreibung (neue Version aus KAMOS (APA-Modul)):

Zwei Glieder 1 und 2 sind durch ein Drehgelenk miteinander verbunden und werden an den Punkten P_1 und P_2 jeweils durch ein Drehgelenk geführt. Berechnet wird der Kopplungsgelenkpunkt P, der durch die konstanten Abstände l_1 und l_2 oder die zeitlich veränderliche Abstandsstrecken S1 und S2 von den Führungspunkten bestimmt wird. Eine der beiden möglichen Lösungen wird durch die Kenngröße K ausgewählt. Das Vorzeichen der Kenngröße orientiert sich an der Richtung von P_1 nach P_2. Liegt P beim Blick von P_1 nach P_2 auf der linken Seite, so ist K = +1 zu setzen, und K = -1 gilt, wenn P rechts der Blickrichtung von P_1 nach P_2 liegt. Für die Lage der Führungspunkte gilt, dass ihr Abstand kleiner als die Summe und größer als die Differenz der Gliedlängen sein muss.

Eingabe:

Gliedlänge 1 oder Abstandsstrecke 1	l_1 , S_1 (s, s°, s°°)	
Gliedlänge 2 oder Abstandsstrecke 2	l_2, S_2 (s, s°, s°°)	
Kenngröße	K	
Anschlussgelenk 1	P_1	(x_{P1}, y_{P1}, $x°_{P1}$, $y°_{P1}$, $x°°_{P1}$, $y°°_{P1}$)
Anschlussgelenk 2	P_2	(x_{P2}, y_{P2},$x°_{P2}$, $y°_{P2}$,$x°°_{P2}$, $y°°_{P2}$)

Ausgabe:

Gliedpunkt	P	(xP, yP, x°P, y°P, x°°P, y°°P)

Funktionsbereich:

$(l_1 + l_2)^2 > [(x_{P2} - x_{P1})^2 + (y_{P2} - y_{P1})^2] > (l_1 - l_2)^2$

In Anlehnung an VDI 2729 und dem Programm KAMOS

A-TB : Modul DDD - Programmcode

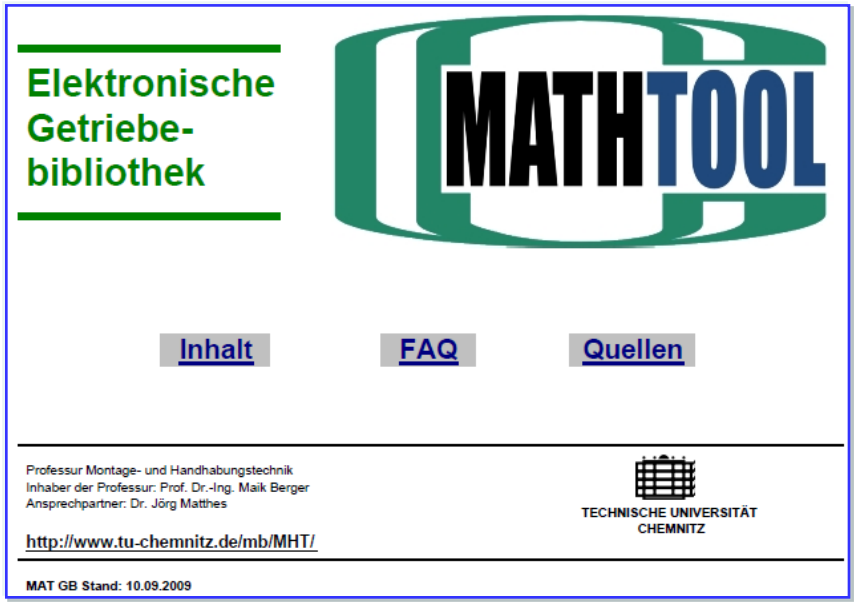
DDD - Programmcode

$$\mathrm{DDD}(S_1,S_2,K,P_1,P_2) :=$$

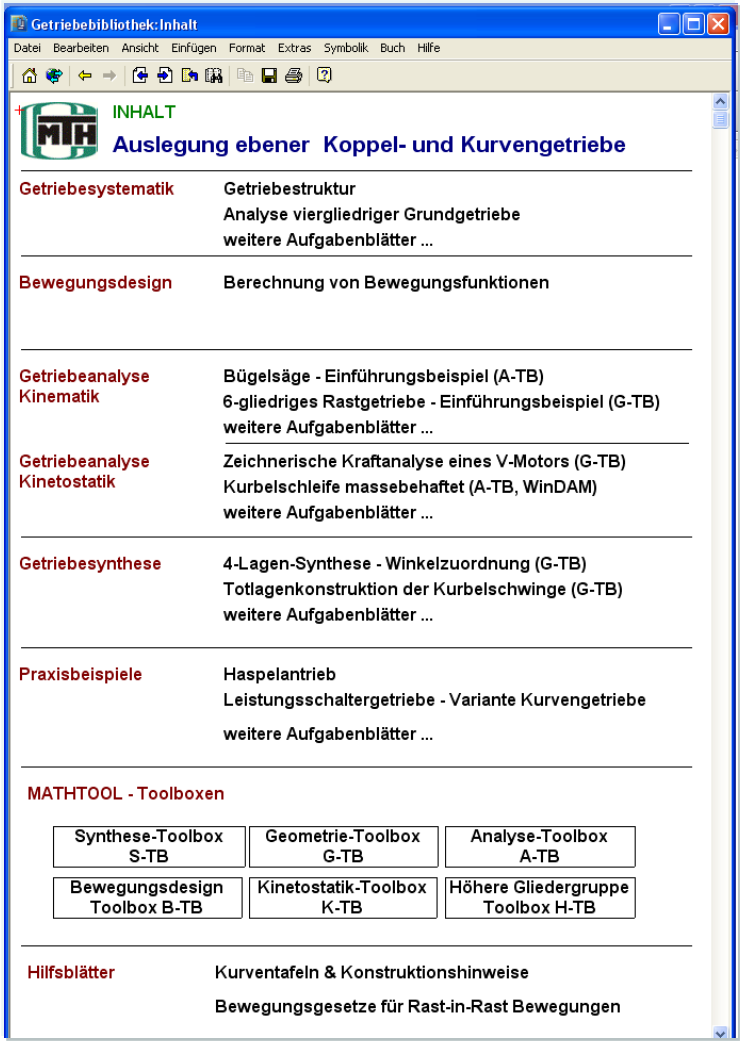
$$S_1 \leftarrow (S_1 \;\; 0 \;\; 0) \text{ if } \mathrm{spalten}(S_1) = 0$$
$$S_2 \leftarrow (S_2 \;\; 0 \;\; 0) \text{ if } \mathrm{spalten}(S_2) = 0$$
$$H_1 \leftarrow P2_{0,0} - P1_{0,0}$$
$$H_2 \leftarrow P2_{1,0} - P1_{1,0}$$
$$H_3 \leftarrow 2\cdot\left(H_1^2 + H_2^2\right)$$
$$H_4 \leftarrow \left(S1_{0,0}\right)^2 + \frac{H_3}{2} - \left(S2_{0,0}\right)^2$$
$$H_5 \leftarrow K\cdot\sqrt{2\cdot\left(S1_{0,0}\right)^2\cdot H_3 - H_4^2}$$
$$H_6 \leftarrow \frac{H_2\cdot H_4 + H_1\cdot H_5}{H_3}$$
$$H_7 \leftarrow \frac{H_1\cdot H_4 - H_2\cdot H_5}{H_3}$$
$$P0_{0,0} \leftarrow P1_{0,0} + H_7$$
$$P1_{0,0} \leftarrow P1_{1,0} + H_6$$
$$H_8 \leftarrow P2_{0,1} - P1_{0,1}$$
$$H_9 \leftarrow P2_{1,1} - P1_{1,1}$$
$$H_{10} \leftarrow H_6 - H_2$$
$$H_{11} \leftarrow H_7 - H_1$$
$$H_{12} \leftarrow H_6 \cdot H$$
$$H_{1}$$

4 Elektronisches Handbuch zur Getriebeauslegung

Eingangsseite



Inhaltsverzeichnis



Grundlegender Aufbau des E-Books

Die Arbeit mit dem E-Book bietet folgende Vorteile:

- Rubriken (Getriebesystematik, Analyse, …)
- Verweise (Hyperlinks zu beliebigen Dateien)
- Toolbox (Sammlung von Berechnungsmodulen)
- Beispiele (ausgearbeitete Arbeitsblätter)
- Hilfen (Hinweise, Skizzen, Quellen)

4 Elektronisches Handbuch zur Getriebeauslegung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

Unterteilung der Getriebebibliothek

Bereich 1: Lehre

Arbeitsblätter zur Analyse aller 4gliedriger Getriebe

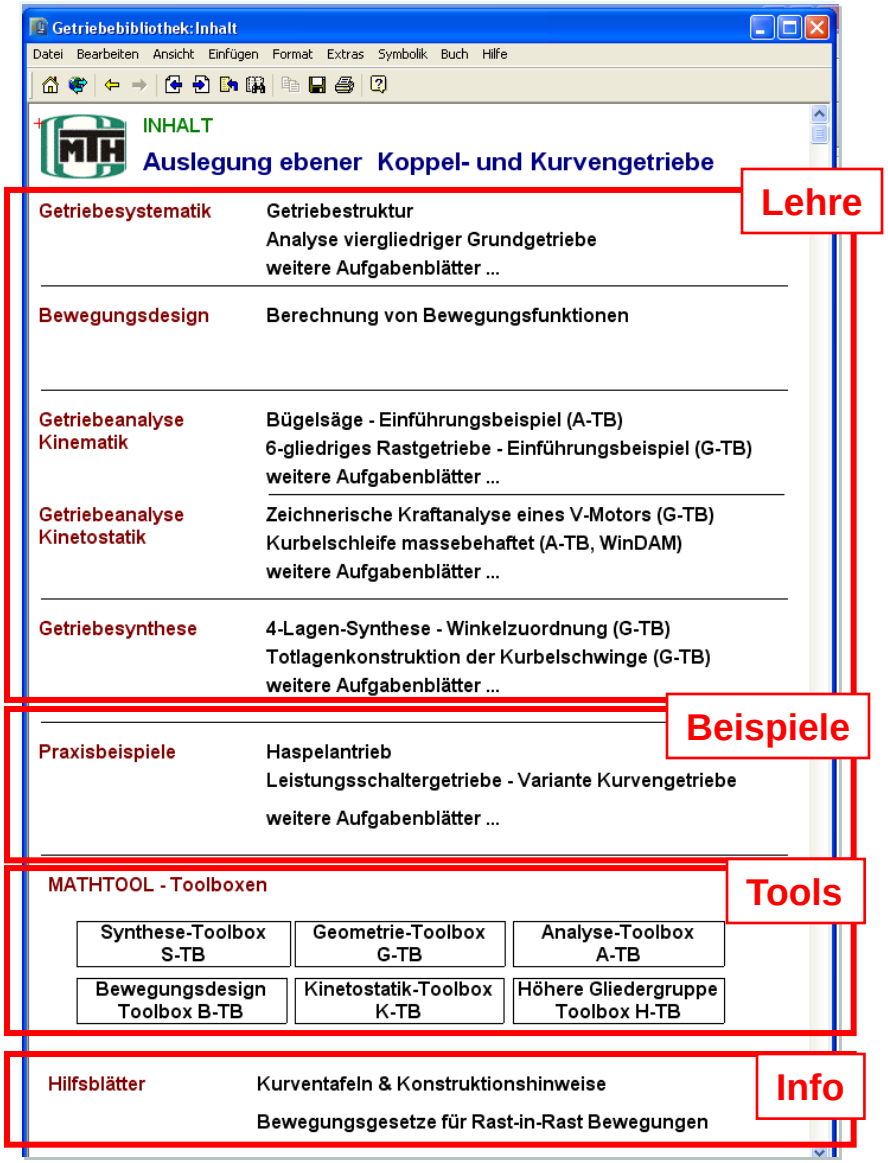
Bereich 2: Beispiele

Lehrbeispiele zu unterschiedlichen Aufgabenstellungen

Synthese unter Einsatz der Pro/E Mathcad-Analyse

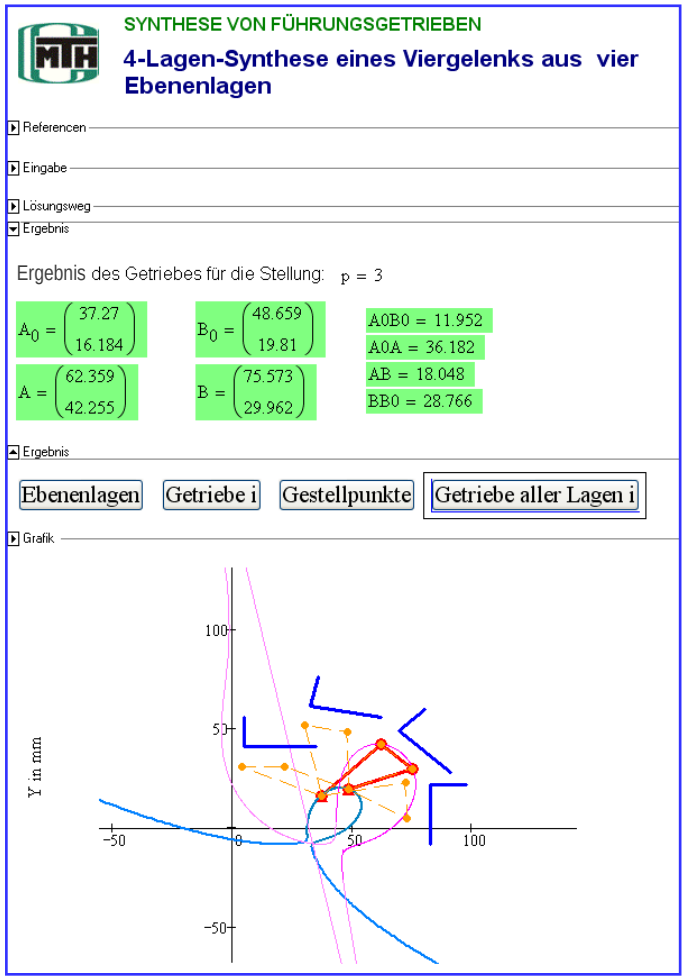
Bereich 3: Tools

Bereich 3: Informationen



Programm-Funktionalitäten am Beispiel Getriebesynthese

Beispiel 4-Lagensynthese mit S-TB



Einbinden der gesamten Synthese-Toolbox

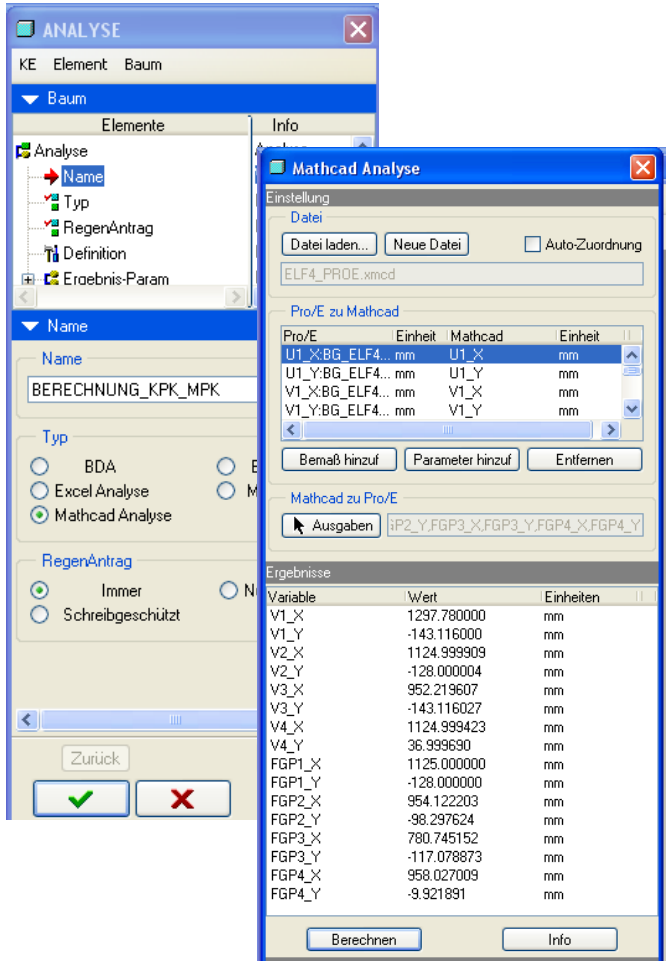
Übertragung der Eingabeparameter

proe2mc

mc2proe

Abmessungen eines Lösungs-getriebes oder der Familientabelle

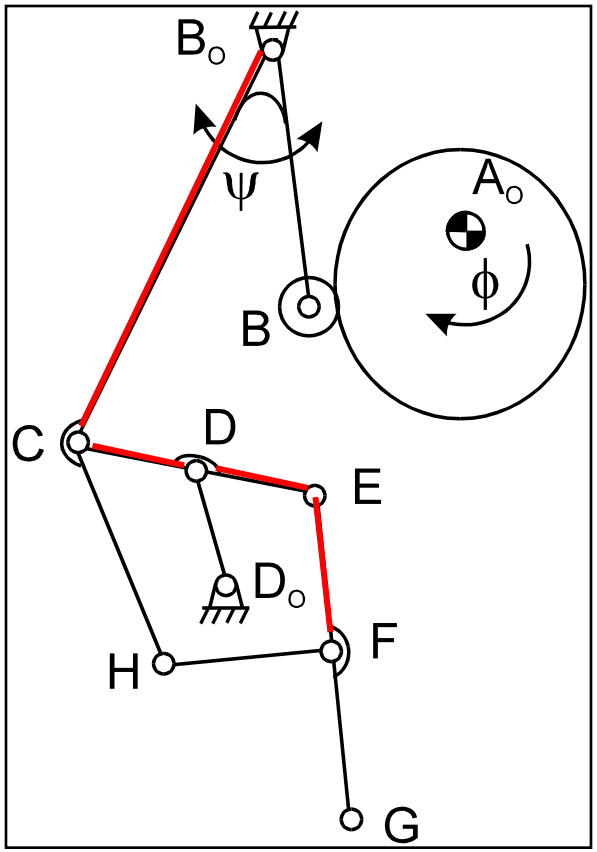
Pro/E Mathcad Analyse



Anwendungsbeispiel – Getriebesynthese/Analyse

Auslegung eines Sauggreifergetriebes einer Druckmaschine, bestehend aus einem Koppelgetriebe (B_0CDD_0EFH) und einem Kurvengetriebe (A_0BB_0) für vorgegebene Lagen des Greifers.

Prinzipskizze



Gegeben:

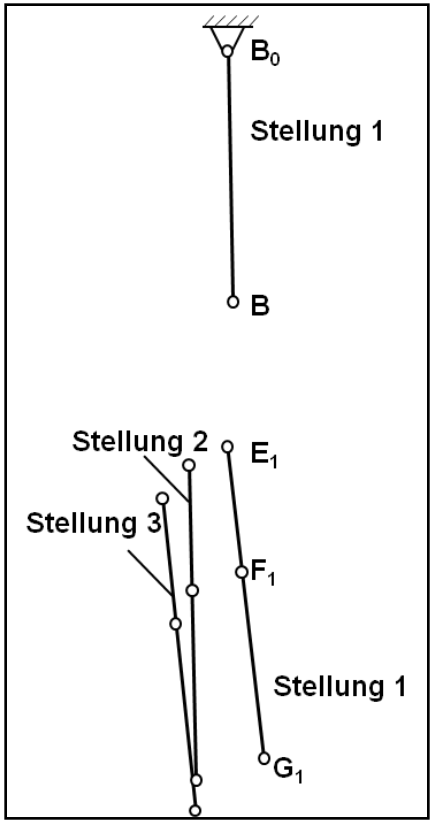
für das Koppelgetriebe:
- die Lage von B_0
- Gliedlängen:
  - B_0C = 336 mm,
  - CE = 160 mm,
  - DE = 90 mm,
  - EF = 80 mm,
- Gelenkpunkte C, D, E auf einer Geraden
- Lagen 1, 2, 3 von Getriebeglied EFG (siehe Lagenskizze)

für das Kurvengetriebe:
Schwinghebellänge B_0B = 160 mm
Übertragungswinkel μ_{min} = 60

Schwingbewegung
(180 Rast-in-Umkehr)

Gesucht:
1. Vollständiges Koppelgetriebe
2. Einfacher Kurvenantrieb

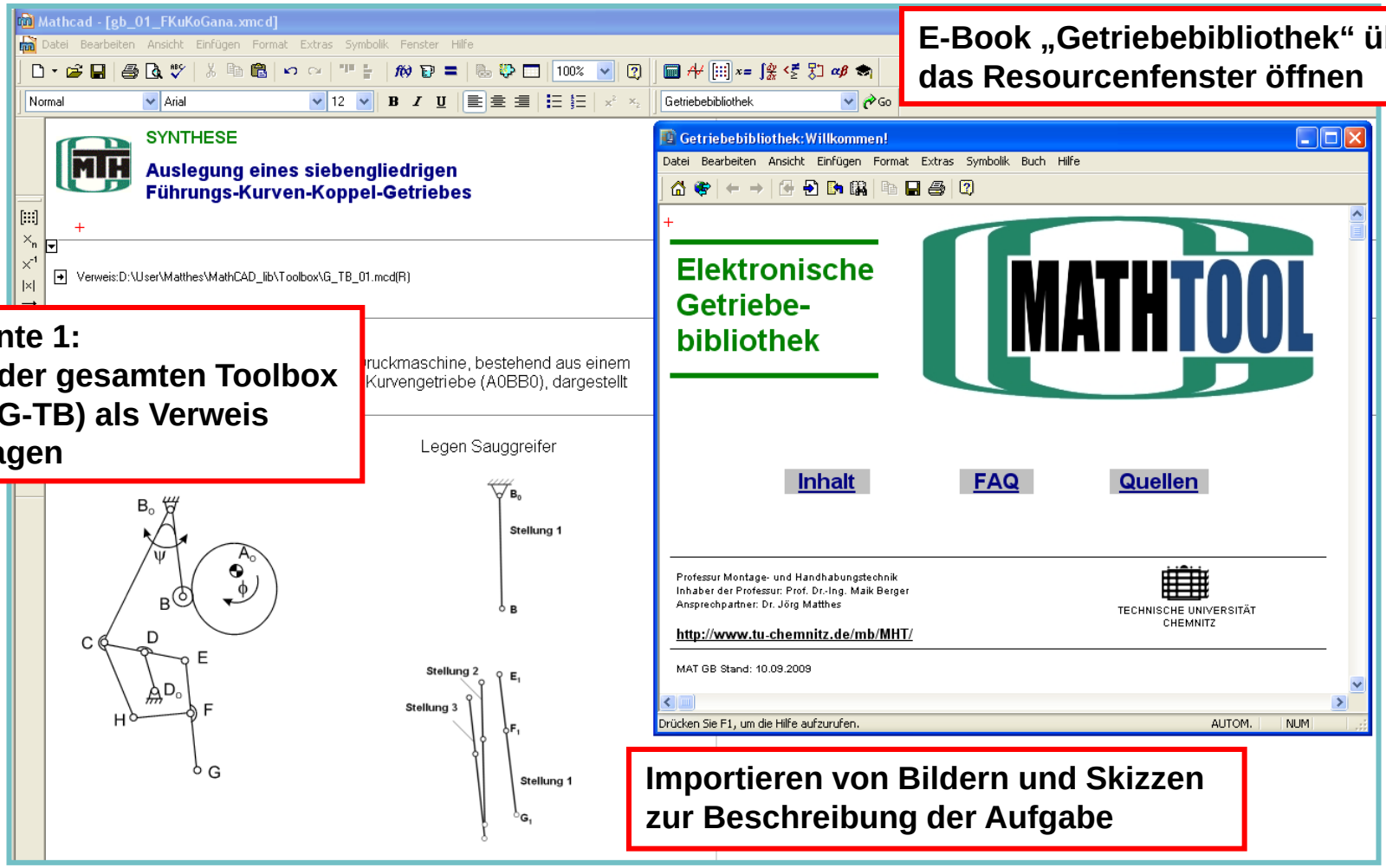
Lagenskizze



Einbinden einer Toolbox

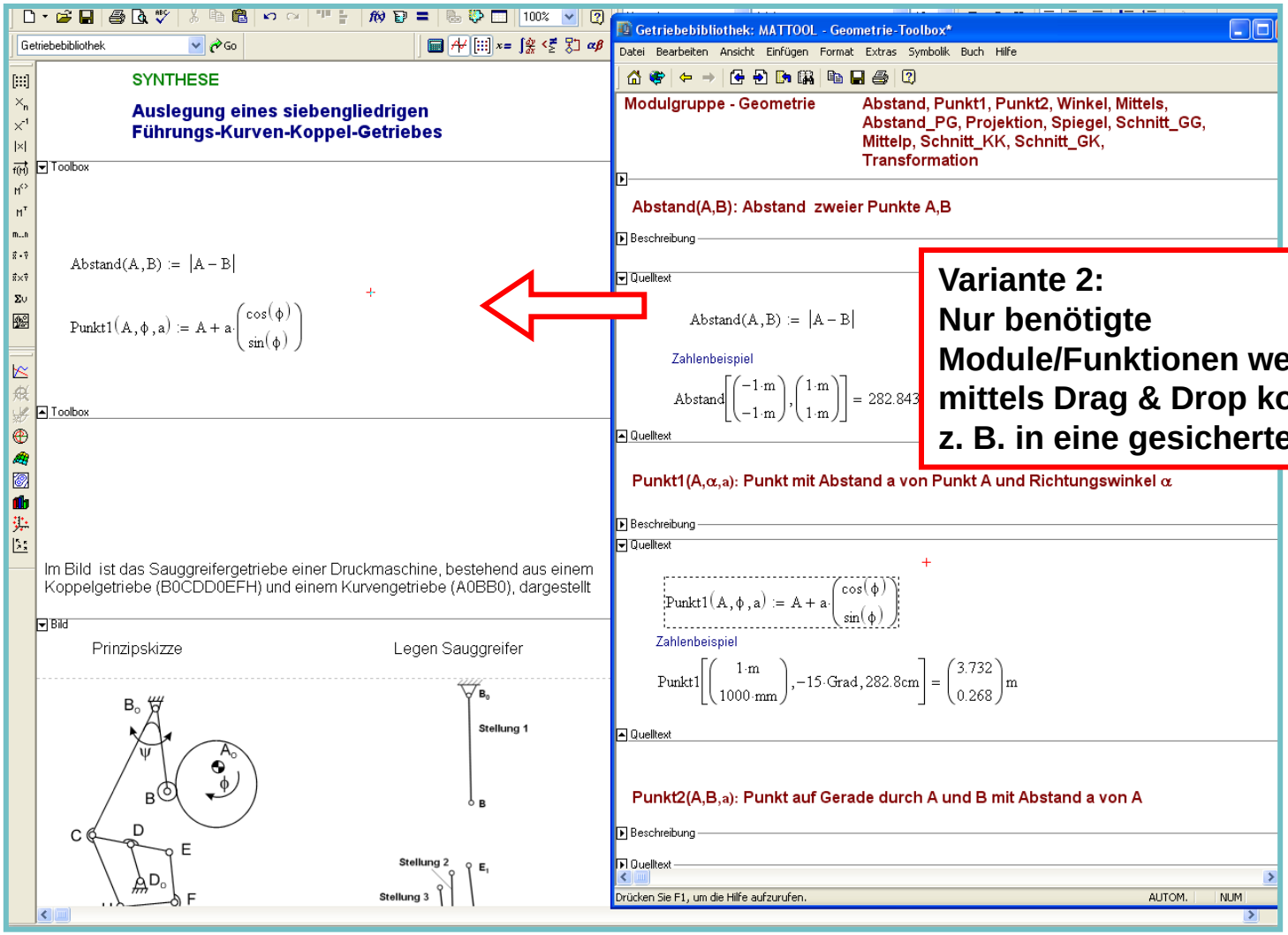
E-Book „Getriebebibliothek“ über das Resourcenfenster öffnen

Variante 1:
Pfad der gesamten Toolbox (hier G-TB) als Verweis eintragen



Importieren von Bildern und Skizzen zur Beschreibung der Aufgabe

Drag & Drop von Modulen



Variante 2:
Nur benötigte Module/Funktionen werden mittels Drag & Drop kopiert z. B. in eine gesicherte Region

5 Beispiel Sauggreifergetriebe einer Druckmaschine

Drag & Drop aus Beispielaufgaben

Gegeben:

für das Koppelgetriebe:

Gestellpunkte: $B_0 := \begin{pmatrix} xb0 \\ yb0 \end{pmatrix}$

Gliedlängen des Viergelenks: $l_{CB0} := CB_0 \quad l_{CE} := CE \quad l_{DE} := DE \quad l_{EF} := FG \quad l_{EG} := EG$

3 Lagen des geführten Gliedes: $G_0 := \begin{pmatrix} xf0 \\ yf0 \end{pmatrix} \quad G_1 := \begin{pmatrix} xf1 \\ yf1 \end{pmatrix} \quad G_2 := \begin{pmatrix} xf2 \\ yf2 \end{pmatrix} \quad \varepsilon f := \begin{pmatrix} Lagewinkel_0 \\ Lagewinkel_1 \\ Lagewinkel_2 \end{pmatrix}$

für das Kurvengetriebe: $l_{BB0} := BB_0 \quad \mu_{min} := \mu min$

Bewegungsablauf mittels Kosinusfunktion

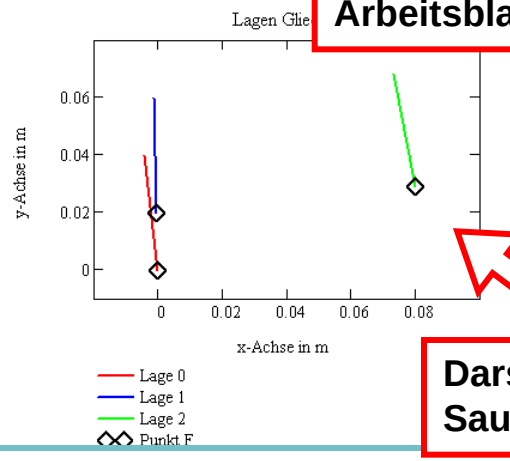
Gesucht: komplettes Getriebe in

Variablendefinition (ohne Wertzuweisung)

Entfernen der Einheiten durch Rechnen mit SI Einheiten je nach Einheitensystem des Arbeitsblattes

Einheiten entfern

Grafik Lagen



Darstellung der Lagen des Sauggreifers

Getriebebibliothek: Zweilagensynthese

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Extras Symbolik Buch Hilfe

SYNTHESE - LAGENGEOMETRIE

2-Lagen-Synthese eines Viergelenks (Winkelzuordnung)

Zuordnungswinkel: $\phi_{12} := \phi 12 \quad \psi_{12} := \psi 12$

Gestellpunkte: $A_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot m \quad B_0 := \begin{pmatrix} xb0 \\ yb0 \end{pmatrix}$

Gelenkpunkt der Kurbel in der ersten Lage: $A_1 := \begin{pmatrix} xa1 \\ ya1 \end{pmatrix}$

ucht:
- Gelenkpunkt der Koppel
- Übertragungsfunktion des Viergelenks

weise: Script GT Synthese S.19

Eingabe: Gestellpunktkoordinaten, Position des Antriebs und Zuordnungswinkel:

$xb0 \equiv 47 \cdot mm \quad xa1 \equiv 25 \cdot mm \quad \phi 12 \equiv 30 \cdot Grad \quad \psi 12 \equiv -40 \cdot Grad$

$yb0 \equiv 0 \cdot mm \quad ya1 \equiv -9 \cdot mm$

Wertzuweisung

Berechnung

Ermittlung des Gelenkpunktes der Kurbel in der zweiten Lage:

$A_2 := \text{Transformation}\left(\frac{A_1}{m}, \frac{A_0}{m}, \frac{A_0}{m}, \phi_{12}\right) \cdot m$

Lösung der Syntheseaufgabe

Lösungsweg Synthese

Berechnungen $i := 0..2 \quad j := 1..2$

1. Gelenk am gef. Glied: $E_i := \text{Punkt1}(G_i, \varepsilon f_i, l_{EG})$

Gelenk zwischen Antriebsschwinge und Koppel: $C_i := \text{Schnitt_KK}(B_0, l_{CB0}, E_i, l_{CE}, 1)$

Antriebswinkel: $\phi_i := \text{Winkel}(B_0, C_i)$

Gelenk D zwischen Koppel und zweiter Schwinge: $D_i := \text{Punkt2}(E_i, C_i, l_{DE})$

Schwingendrehpunkt im Gestell als Mittelpunkt: $D_0 := \text{Mittelp}(D_0, D_1, D_2)$

Zweiter Gelenkpunkt an der gef. Ebene: $F_i := \text{Punkt2}(G_i, E_i, l_{EF})$

Relativlagen des Greiferpunktes bzgl. Antriebsschwinge: $F_{r_i} := \text{Transformation}(F_i, B_0, B_0, \phi_0 - \phi_i)$

Schwingendrehpunkt im Gestell als Mittelpunkt: $H_0 := \text{Mittelp}(F_{r_0}, F_{r_1}, F_{r_2})$

Lagen Schwingenpunkt bzgl. B_0: $H_i := \text{Transformation}(H_0, B_0, B_0, \phi_i - \phi_0)$

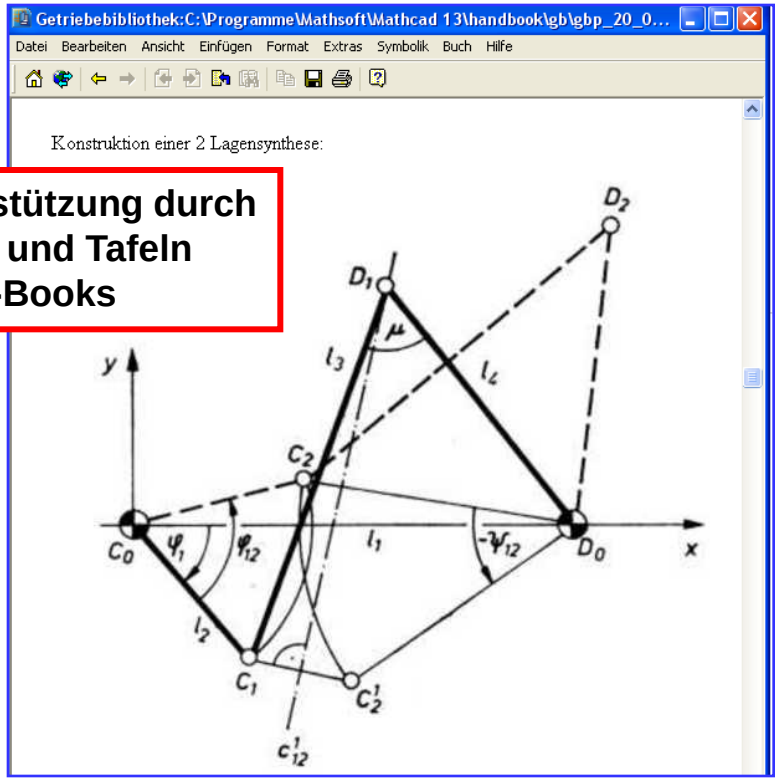
Abmessungen $l_{DD0} := |D_0 - D_0| \quad l_{HF} := |H_0 - F_0| \quad l_{CH} := |H_0 - C_0|$

$w_{HCB0} := \text{Winkel}(C_0, B_0) - \text{Winkel}(C_0, H_0)$

Lösungsweg Synthese

Abfolge der Berechnungsschritte in Anlehnung an die geometrische Lagensynthese
→ Module der Geometrie-Toolbox

Unterstützung durch Bilder und Tafeln des E-Books



5 Beispiel Sauggreifergetriebe einer Druckmaschine

Auswertung & Analyserechnung

Ergebnis: Übertragungsfunktion und vergrößerte Darstellung des Rastbereiches

Berechnete Abmessungen

Schwingendrehpunkt, -längen $D_0 = \begin{pmatrix} -0.088 \\ 0.125 \end{pmatrix}$ $l_{DD0} = 0.086$

Anlenkpunkt an Antriebsschwinge $l_{CH} = 0.147$ $w_{HCB0} = -232.959\,\text{Grad}$

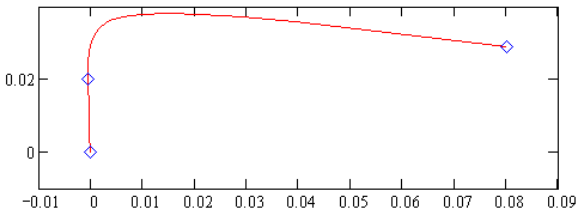
Länge der zweiten Koppel $l_{CH} = 0.147$

Ausgabe der Abmessungen

Analyse des Getriebes für den gesamten Schwingwinkel

Analyse

Bahnkurve



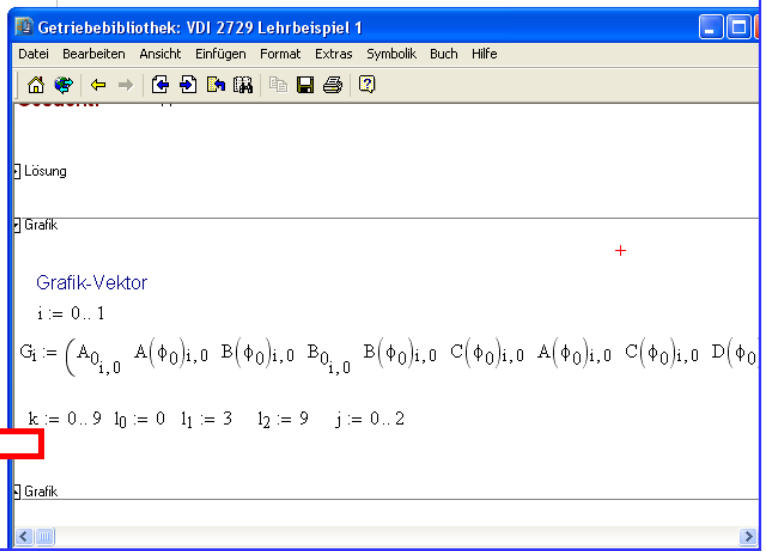
Grafik

$k := 0..1 \quad l := 0..2 \quad v := 0..9 \quad w := 0..2$

$GG_{k,1} := \left[B0_k \ (C1)_k \ (D1)_k \ D0_k \ (D1)_k \ (E1)_k \ (G1)_k \ (F1)_k \ (H1)_k \ (C1)_k\right]^T \cdot m$

$Ge_{k,1} := \left(B0_k \ D0_k \ D0_k\right)^T \cdot m$

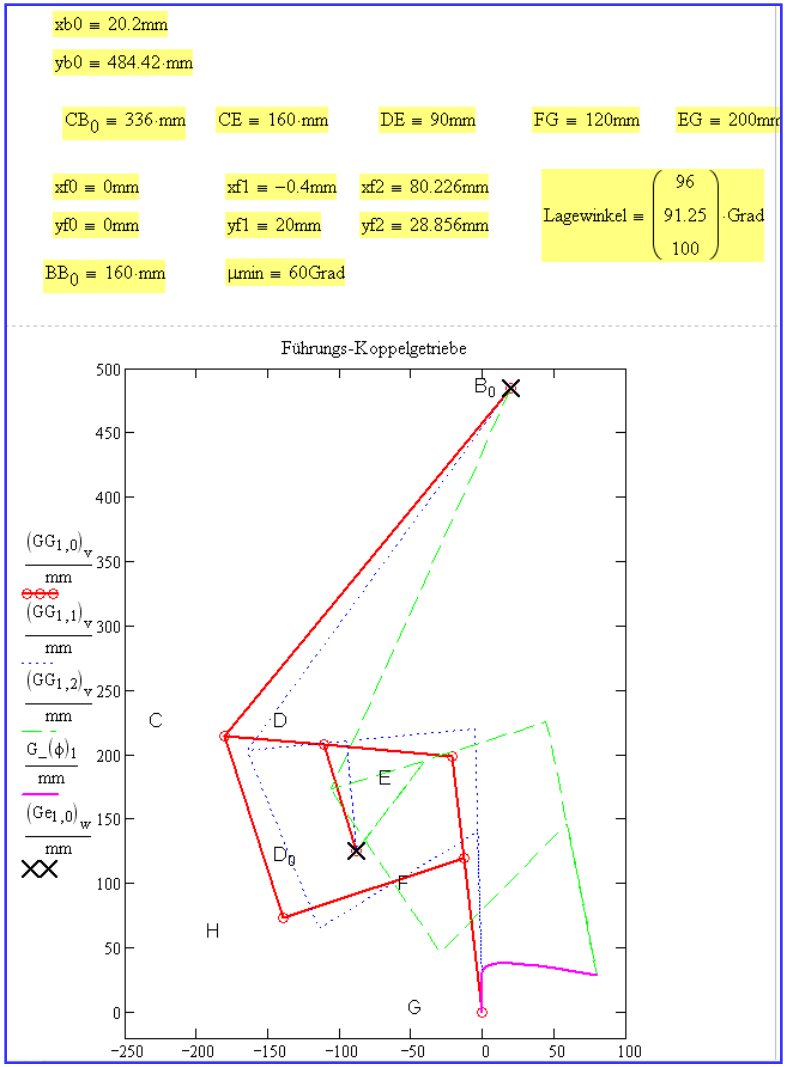
Grafik



Kopieren und Anpassen der Grafikausgabe aus einem Beispiel des E-Books

5 Beispiel Sauggreifergetriebe einer Druckmaschine

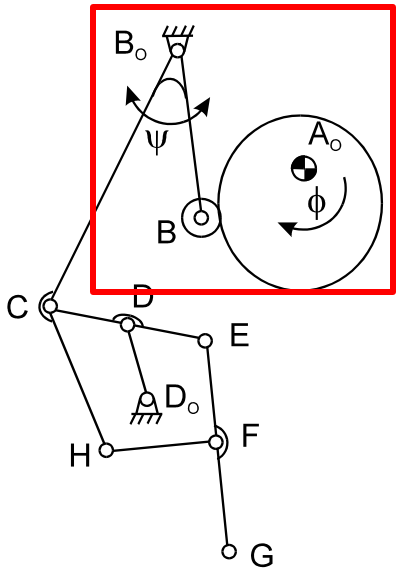
Variation der Werte – Ausgabe der Getriebeskizze



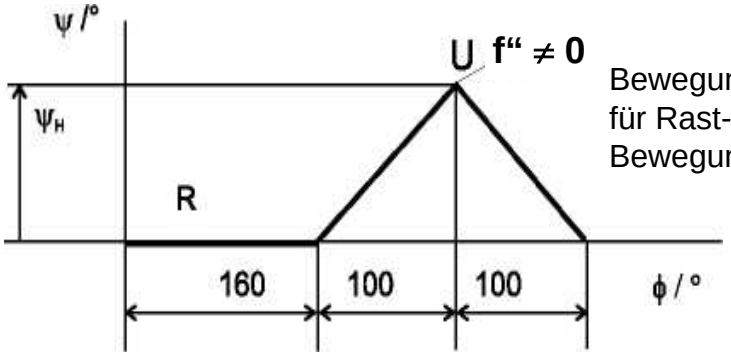
Wertzuweisung erst direkt über der Ausgabe der Skizze → Variation der Werte lassen sich sofort anzeigen

Ausgabe des Koppelgetriebes

Auslegung des Kurvengetriebes



Berechnung der Übertragungsfunktion



Bewegungsplan
für Rast-in-Umkehr
Bewegung

Berechnung Lagerpunkt Kurvenscheibe für kleinstes Kurvengetriebe

Verfahren von Flocke

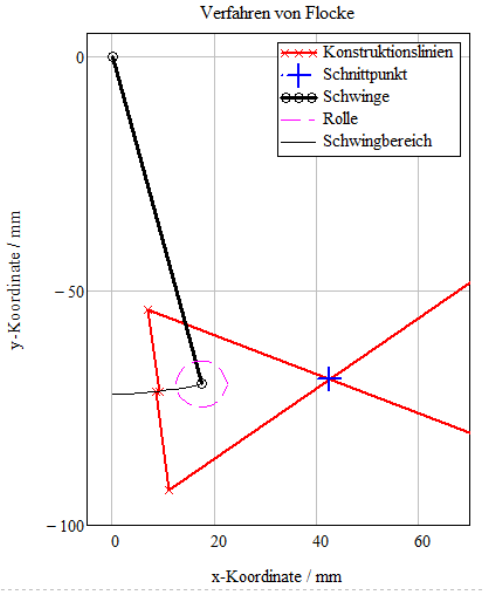
$\mu min := 60Grad$

$B0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} mm \qquad Bi := \begin{pmatrix} 0mm \\ -BoBz \end{pmatrix} \qquad Bi = \begin{pmatrix} 0 \\ -72 \end{pmatrix} mm$

$Ba := Punkt1[B0, (270Grad - dy), BoBz] \qquad Ba = \begin{pmatrix} 17.418 \\ -69.861 \end{pmatrix} mm$

$Bv_P := Punkt1(B0, 270Grad + yx_P, BoBz) \qquad Bv_P = \begin{pmatrix} 9.192 \\ -71.411 \end{pmatrix} mm \qquad \psi v_P := Winkel(B0, Bv_P)$

$Bv_N := Punkt1(B0, 270Grad + yx_N, BoBz) \qquad Bv_N = \begin{pmatrix} 8.52 \\ -71.494 \end{pmatrix} mm \qquad \psi v_N := Winkel(B0, Bv_N)$



min. Grundkreisradius

$rGmin := Abstand(Bi, A0)$

$rGmin = 42.622\,mm$

Achsabstand

$l0 := Abstand(B0, A0)$

$l0 = 80.93\,mm$

Winkel Geschw.vektoren

$\psi v_P = 277.335\,Grad$

$\psi v_N = 276.796\,Grad$

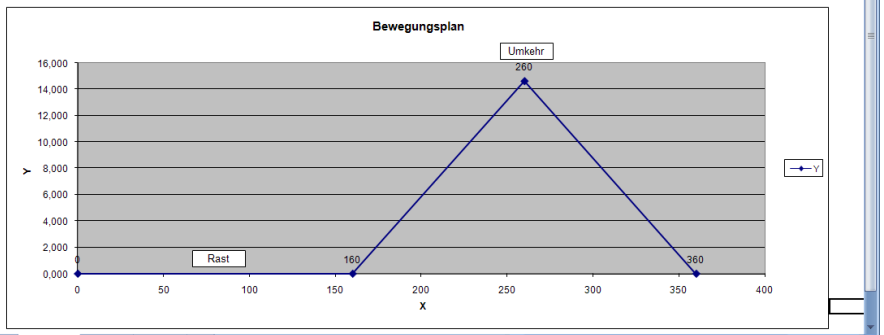
Eingabe in Excel-Formular

Definition der Antriebsbewegung

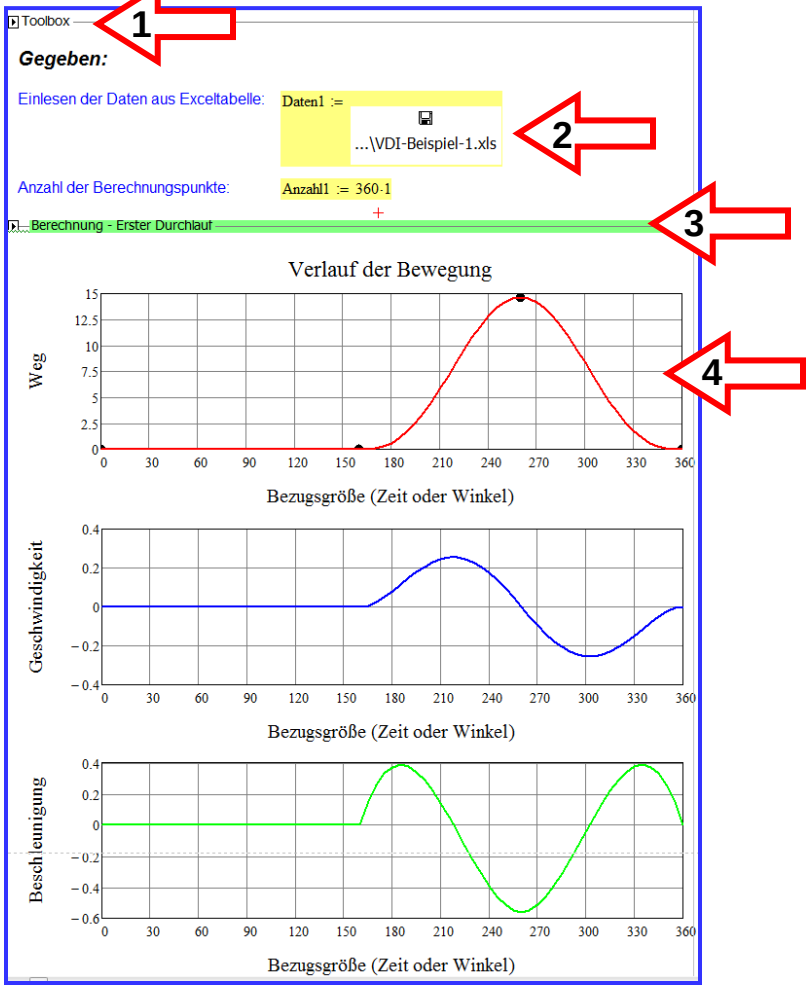
Projekt: Sauggreiferantrieb
Bearbeiter: Dr. Matthes

Datum: 14.04.2010
Firma: TU Chemnitz
Stand: in Bearbeitung

Pos	X	Y	Bewegung zum Punkt	Param.	Randbedingungen			Schritte	Punkt	Bedingung		
			Bewegungsgesetz	lambda	y'	y''	y'''	für Ausgabe	Polynomoptimierung	y'	y''	y'''
0	0	0,000	Anfangspunkt		0,000	0,000	0,000		Rast	fest	fest	fest
1	160	0,000	Gerade		0,000	0,000	0,000	10	Rast	fest	fest	fest
2	260	14,658	Polynom 5.Grades		0,000	0,000	0,000	100	Umkehr	fest	stetig	stetig
3	360	0,000	Polynom 5.Grades		0,000	0,000	0,000	100	Rast	fest	fest	fest



Aufruf Mathcad-Arbeitsblatt zur Berechnung von Antriebsfunktionen



1 Verknüpfung mit B-TB

2 Einlesen der Daten

3 Berechnung der ÜF

4 Ausgabe der ÜF

E-Book Mechanism-Lib

Index

Analysis of plane link mechanisms

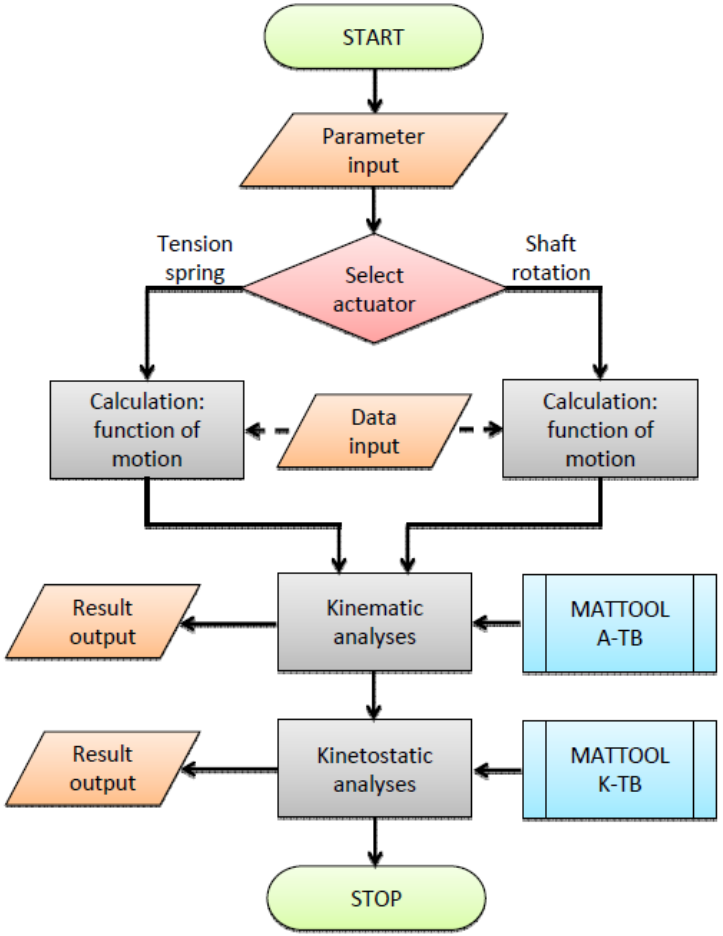
Example	Example 1
	Example 2
Analysis of standard circuit breaker topologies	A) DTB with HMB
	B) DTB with Spring Drive (FSA1)
	C) DTB with Spring Drive (MSD)
	D) LTB with Spring Drive (MSD)
	E) LTB with Spring Drive (FSA)
	F) LTB with Spring Drive (FSA) with Dog Bone
	G) LTB with Spring Drive (MSD) with Dog Bone
	H) LTB with Spring Drive (MSD) Dog Bone + Double Break

MATTOOL - Toolboxen

Kinetostatik-Toolbox K-TB	Geometrie-Toolbox G-TB	Analyse-Toolbox A-TB

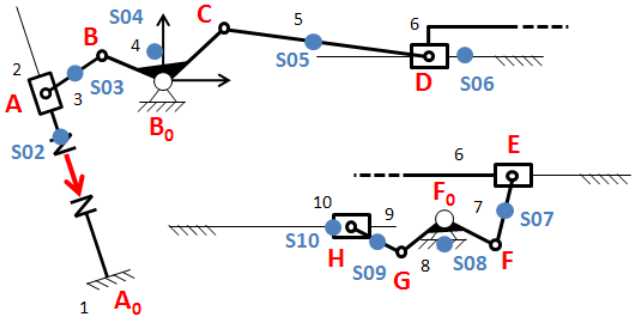
Description	Pinciples of mechanism Analysis
	Literature

Grundstruktur der Berechnungsabfolge



Kinematische und kinetostatische Analyse von Schaltanlagen

Kinematisches Schema



Mathcad

Mechanism_LIB:C:\Programme\Mathsoft\Mathcad 13\handbook\Mechanism_LIB\A - DTB with HMB.xmcd

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Extras Symbolik Buch Hilfe

LINKAGE TOPOLOGIES

DTB - hydraulic drive (HMB)

CHEMNITZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CLIENT	ABB Schweiz AG
Project	Linkages with MATTOOL
Task No.	0001
Created by	Dipl. Ing. A. Heine

TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik
Reichenhainer Str. 70, Zi. E117
Tel.: (0371) 531-37576
Fax: (0371) 531-23339
Mail: andreas.heine@mb.tu-chemnitz.de
http://www.tu-chemnitz.de/mb/M

Verknüpfung mit A-TB und K-TB

Toolbox

Kinematic Analysis

Sketch

Geometry parameter

Format of Points: $P := \begin{pmatrix} x & \dot{x} & \ddot{x} \\ y & \dot{y} & \ddot{y} \end{pmatrix}$

Fixed points:

Spring base $A_0 := \begin{pmatrix} -50mm & 0 & 0 \\ -500mm & 0 & 0 \end{pmatrix}$ Mech shaft $B_0 := \begin{pmatrix} 0mm & 0 & 0 \\ 0mm & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Gear origin $F_{0_O} := \begin{pmatrix} 1100mm & 0 & 0 \\ 75mm & 0 & 0 \end{pmatrix}$ Spring direction $A_{SP} := 100Grad$

MC axis position (y)

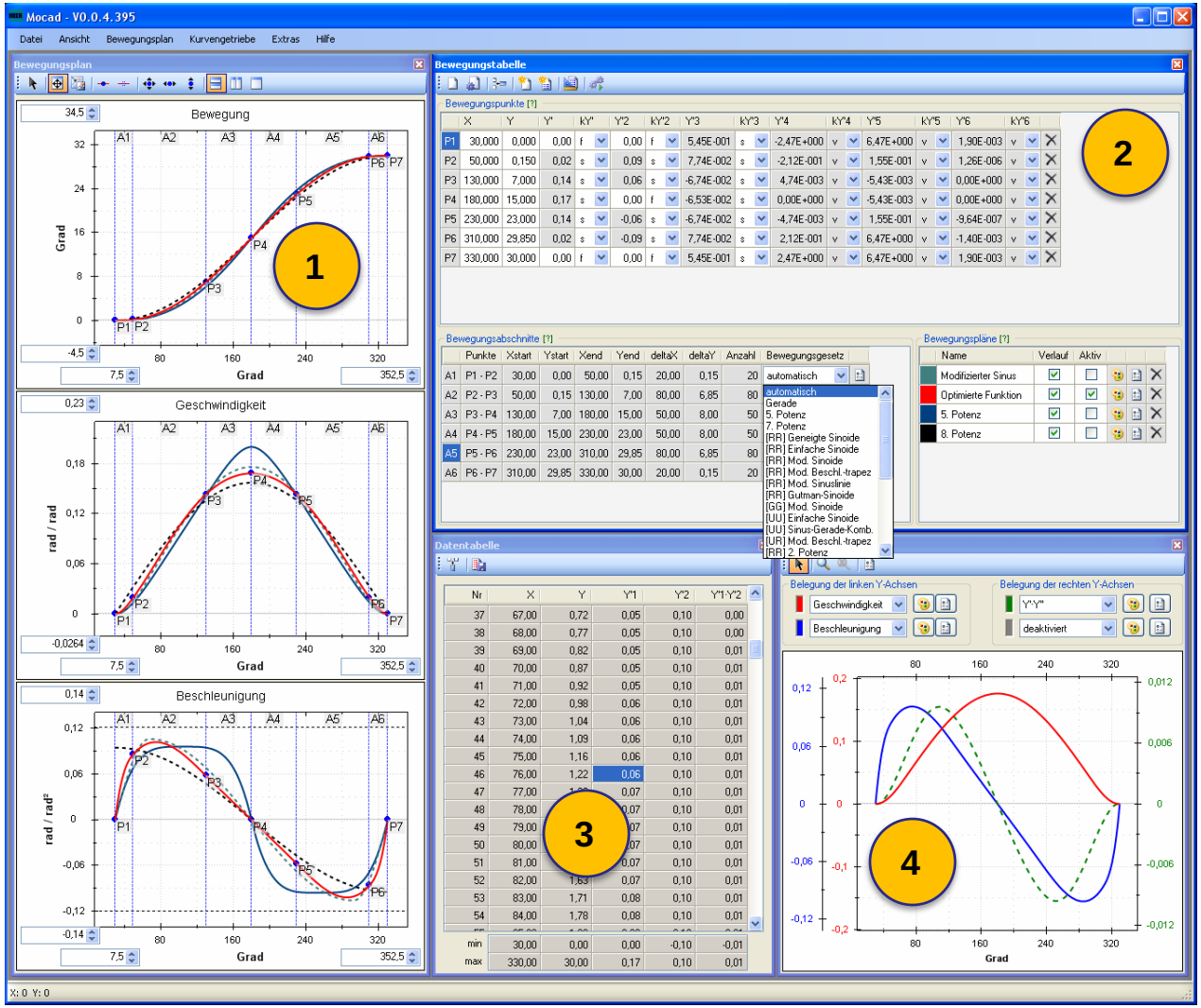
Drücken Sie F1, um die Hilfe aufzurufen. Rechner F9 NUM

Oberfläche des Programms MOCAD - MOtion and CAm Design

MOCAD

1 Bewegungsplan
2 Bewegungstabelle
3 Datentabelle
4 Multi-Diagramm

MOCAD – Berechnung der ÜF und der Abwicklung räumlicher Kurvengetriebe



Zusammenfassung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Montage- und Handhabungstechnik

- Der Einsatz von Arbeitsblättern bietet Vorteile gegenüber kompakten Programmen vor allem im Bezug auf Flexibilität, Dokumentation, Datenhandling, Wartung.
- E-Book erleichtert das Erstellen von neuen Arbeitsblätter durch die Bereitstellung einer strukturierten Sammlung von häufig verwendeten Berechnungsfunktionen.
- Fundus von Arbeitsblättern bereits berechneter Getriebe im E-Book dient als Vorlage für neue Getriebeauslegungen.
- MATHTOOL-Konzept bietet umfangreichen Funktionsumfang zur Lösung antriebstechnischer Aufgabenstellungen.
- Einsatz in der Industrie ermöglicht die Sammlung von standardisierten, firmenspezifischen Berechnungsvorlagen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit