

Zur mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren – Das Beispiel „Mechanismenentwurf“

Burkhard Alpers, Hochschule Aalen, 25.10.2006

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Untersuchungsergebnisse
 - 3.1 Beschreibung der Studenten
 - 3.2 Vorgehensweise, Ergebnisse und Probleme
 - 3.3 Antworten auf die Untersuchungsfragen
4. Resümee und Ausblick
5. Literatur

Anhang:
Aufgabenstellung
Anweisung an Studenten

1. Einleitung

Ziel des Projekts zur „Mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren“ ist es zu untersuchen, welche Rolle mathematisches Verständnis bei der alltäglichen Arbeit eines Maschinenbauingenieurs spielt. Dazu werden „typische“ Aufgaben in Zusammenarbeit mit einem Anwendungskollegen identifiziert und von zwei Studenten des achten und letzten Semesters bearbeitet. Der Untersuchungsansatz mit seinem Potential und Risiken wurde bereits ausführlich in (Alpers, 2005) dargelegt. Nachdem in der ersten Untersuchungsphase eine Vorrichtung zu erstellen war, die gewissen Lasten, dynamischen Anregungen und Bauraum- und Gewichtsbeschränkungen unterlag, geht es in der im vorliegenden Bericht beschriebenen zweiten Projektphase um einen „typischen“ Mechanismus, der einer real existierenden Maschine entnommen wurde, die früher im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht worden war. Die Aufgabenstellung wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben. Abschnitt 3 fasst dann die Untersuchungsergebnisse zusammen. Zunächst werden die Aufgabenbearbeiter mit ihren Ausbildungscharakteristika kurz vorgestellt. Dann werden ausführlich deren Vorgehensweise, die erzielten Ergebnisse und die auftretenden Probleme beschrieben, wobei aber die mathematikrelevanten Aspekte im Vordergrund stehen. Diese Beschreibung liefert die Basis für die Beantwortung der Untersuchungsfragen, die in (Alpers, 2005) erläutert und in Bezug zu existierenden Forschungsarbeiten zur Mathematik am Arbeitsplatz gesetzt werden. Der letzte Abschnitt enthält ein Resümee und den Versuch, vorläufige Schlussfolgerungen für die Mathematikausbildung zu ziehen.

2. Aufgabenstellung

Die genaue Aufgabenstellung ist im Anhang abgedruckt. Es handelt sich um eine „typische“ Entwurfs- und Realisierungsaufgabe für einen Mechanismus, wie er in vielen Maschinen vorkommt, in denen Teile bewegt werden müssen. Die grundlegende Situation besteht darin, dass eine Folie über eine Vorschubeinheit um eine definierte Länge zu verschieben ist und dann mit einer Messereinheit das vorgeschobene Folienstück abgeschnitten wird. Beim Schneiden tritt neben der reinen Bewegung noch Arbeitslast auf. Die Aufgabenstellung wurde einer existierenden, industriell eingesetzten Maschine entnommen, die im Rahmen einer

vorhergehenden Diplomarbeit in einem CAD-System nachgebildet wurde. Während in der ersten Projektphase (siehe Bericht, 2005) eine statische Vorrichtung betrachtet wurde, die gewissen äußeren Lasten und dynamischen Anregungen unterliegt, geht es in dieser zweiten Aufgabenstellung primär um das grundlegende Bewegungsdesign, weniger um die genaue geometrische Auslegung der einzelnen Teile. Auch typische Dimensionierungsfragen (Auslegung von Federn, Lagern, Linearführungen) spielen allenfalls am Rande eine Rolle. Solche ebenfalls wichtigen Auslegungsaufgaben sollen in der dritten Projektphase betrachtet werden.

Um den Arbeitsaufwand in Grenzen zu halten und um eine reale Arbeitssituation besser nachzubilden, werden zwei Unterstützungen bei der Aufgabenbearbeitung angeboten:

- In einem CAD-Bild wird ein ähnlicher Mechanismus aus derselben Maschine (Klemmeinheit) zur Orientierung dargestellt. Dies spiegelt insofern das reale Vorgehen in der Arbeitswelt wider, als auch dort zunächst untersucht wird, ob es nicht bereits verwendbare Vorlagen gibt, die man nutzen könnte. Da es sich in der Art um eine häufig vorkommende Mechanismenaufgabe handelt, würde man sicher auch in der Praxis fündig. Bei hoch-innovativen Vorfeldarbeiten mag dies nicht der Fall sein, aber im Projekt geht es schwerpunktmäßig um Standardaufgaben.
- Zur Erstellung einer Bewegungsfunktion aus den Bewegungsvorgaben (siehe Anhang), d.h. zur Einpassung geeigneter „Funktionsstücke“, steht ein besonderes Programm zur Verfügung, das es erlaubt, gemäß einer VDI-Richtlinie eine gewisse Funktionsart auszuwählen. Die Einpassung wird dann automatisch vorgenommen. Dies spiegelt die Situation in der Praxis wider, da dort auch mit VDI-Richtlinien-basierten Programmen gearbeitet und die Funktionsstücke nicht mehr mit Hilfe der in der Richtlinie angegebenen Ausdrücke und Einpassungsrechenvorschriften gebildet werden.

Ferner steht zur geometrischen Konstruktion das CAD-Programm Pro/Engineer zur Verfügung, mit dem auch Mechanismen aufgebaut und analysiert werden können. Bezüglich der Mechanismen handelt es sich eher um einen Zusatz und nicht um ein Spezialprogramm wie etwa ein Mehrkörpersimulationsprogramm (z.B. ADAMS® oder SIMPACK®). Letztere werden aber auch wegen ihrer Kosten und wegen der umfangreichen Modellierungsmöglichkeiten meist von Spezialisten bedient, die dem FH-Ausbildungsprofil in der Regel nicht entsprechen.

3. Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die beiden beteiligten Studenten hinsichtlich ihrer Bildungsherkunft, Erfahrungen und aufgabenrelevanten Tätigkeiten im bisherigen Studienverlauf beschrieben. Der darauf folgende Abschnitt befasst sich mit der grundsätzlichen Vorgehensweisen der Studenten bei der Arbeit, den dabei gebildeten oder zugrunde liegenden Modellen und Modellvorstellungen und den Ergebnissen, aber auch den Irrwegen. Der letzte Abschnitt untersucht die Arbeit der Studenten bezüglich der im ersten Bericht dargelegten Untersuchungsfragen, widmet sich also den erforderlichen mathematischen Qualifikationen bei der tatsächlichen oder einer effizienteren Bearbeitung der Aufgabe.

3.1 Beschreibung der Studenten

Beide Studenten befanden sich im Zeitraum der Bearbeitung der Aufgabe im 8. und damit letzten Semester. Sie hatten die Vorlesungen und Prüfungen beendet und noch Zeit bis zum Beginn der Diplomarbeit. Während der eine Student (A) häufiger mit dem betreuenden

Anwendungskollegen Rücksprache gehalten hat, hat der zweite (B) im wesentlichen selbstständig gearbeitet und nur selten den Anwendungskollegen oder den Verfasser aufgesucht. Bei unklaren Vorgaben hat er sich selbst entsprechende Randbedingungen zurecht gelegt.

Student A hat die Realschule und das Technische Gymnasium besucht und damit schulisch sowohl in praktischer als auch in theoretischer Hinsicht eine gute Grundlage. Er hat Erfahrungen mit landwirtschaftlichen Maschinen auf dem elterlichen Hof und damit natürlich auch schon konkretere Vorstellungen von Mechanismen. Das erste Praxissemester absolvierte er bei einem Landmaschinenhersteller, das zweite bei Stihl, wobei es im zweiten allerdings nicht um Mechanismen ging. Mit dem für die Aufgabe genutzten CAD-System Pro/Engineer hat der Student in der CAD-Ausbildung im 3. Semester Erfahrungen gesammelt, nicht aber mit dem Mechanismenteil. Student A gehört zu den besten Studenten seines Semester und hat auch ausgezeichnete Ergebnisse in der Mathematik und in der Mechanik erzielt. Er kann als repräsentativ für die mathematisch und modellierungsmäßig besonders begabten Studenten im Studiengang Maschinenbau an der Fachhochschule betrachtet werden. Was die subjektive Einschätzung der Mathematiknutzung anlangt, so sieht der Student die Mathematik eher in den genutzten Tools verborgen. Auf Befragung nannte er die Notwendigkeit mathematischer Kenntnisse beim Erkennen der begrenzten Möglichkeiten der Offsetkurvenbildung (ohne Kurvenüberschneidung) und der betragsmäßigen Rechnung bei den Analysemessungen in Pro/Engineer (vgl. dazu die nähere Beschreibung in 3.2). Im Hinblick auf die Nützlichkeit der Mathematikausbildung wies er darauf hin, dass bereits im Technischen Gymnasium wichtige Grundlagen gelegt werden und es schwer ist, genau festzumachen, wo der Beitrag der Schule endet und derjenige der FH beginnt.

Student B hat das allgemeinbildende Gymnasium absolviert. Er hat keinen Erfahrungshintergrund durch eigene praktische Tätigkeit. Im ersten Praxissemester war er bei ZF, das zweite hat er bei Audi in der Konstruktion absolviert. In letzterem hat er intensiven Umgang mit Pro/Engineer gehabt, hat sich aber eher mit Bauraumuntersuchungen und kleinen Halterungen beschäftigt als mit Berechnung und Auslegung von Teilen, da viele Teile auch fremdvergeben sind. Mit Mechanismen und deren Umsetzung in Pro/Engineer hat er keine Erfahrung. Student B gehört von den Leistungsbewertungen her zu den guten Studenten (Noten um 2 herum), was auch für die Mathematik zutrifft. In Sachen Mathematiknutzung hat er eher die elementare Mathematik und Geometrie zur ungefähren Auslegung der Abmaße gesehen als mathematische Komponenten der FH-Ausbildung. Das kompliziertere Wissen wie die Konstruktion stückweise definierter Funktionen sieht er in den Tools wie dem Kurvenscheibenberechnungstool versteckt („Das Schwierige wird einem abgenommen.“).

3.2 Vorgehensweise, Ergebnisse und Probleme

Die wesentlichen Schritte bei der Bearbeitung der Aufgabe waren den Bearbeitern klar:

- *Entwurf der Hebelgeometrie:* Es war festzulegen, wie - in einem ersten Entwurf – die Abmaße der Hebelgeometrie sein sollten. Die grundlegende Hebelgeometrie konnte zwar vom Vorlagenbeispiel übernommen werden, für den Entwurf waren aber die Lage der Steuerwelle, des Messers und des Vorschubs sowie der Bewegungshub von Messer und Vorschub zu berücksichtigen.
- *Erstellung der Bewegungsfunktionen für Messer und Vorschub mit Hilfe des zur Verfügung gestellten Tools*
- *Erstellung der Kurvenscheibengeometrie mit den entsprechenden Tools in Pro/Engineer*
- *Entwurf der Federn, die das Anliegen der Hebel an den Kurvenscheiben gewährleisten*

- *Bestimmung des erforderlichen Antriebsmomentes für den Servomotor, der die Kurvenscheiben antreibt.*

Diese Aufgabenteile, die mathematischen Gedanken der Studenten bei ihrer Bearbeitung sowie mögliche alternative Denkweisen sollen im Folgenden vorgestellt werden. Um die Einbettung in den Gesamtentwurf besser zu verstehen, sind in Abbildung 1 Screenshots der endgültigen Konstruktionen dargestellt. Student B hat sich länger mit der Auslegung der Hebelgeometrie beschäftigt und ist im Rahmen des zur Verfügung stehenden Zeitraums von ca. 100 Stunden nicht mehr zur Federauslegung und Momentenbestimmung gekommen.

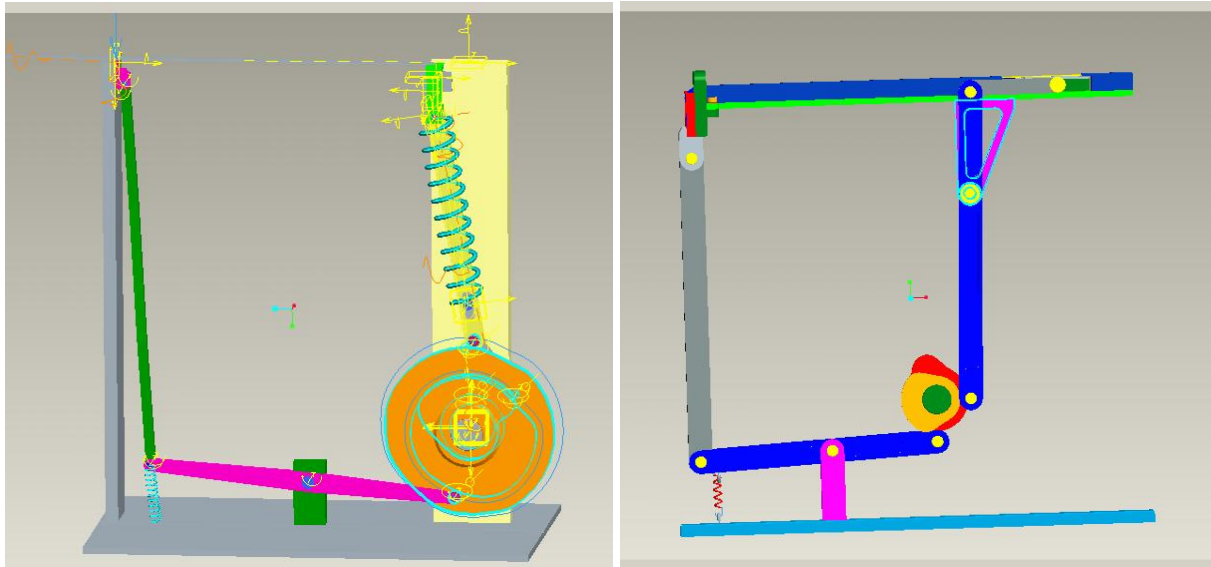


Abbildung 1: Endgültige Konstruktionen (Student A: links, Student B: rechts)

Erster Entwurf für die Hebelgeometrie

Student A hat sich, vielleicht angeregt durch die Abbildung eines ähnlichen Mechanismus (siehe Aufgabenstellung im Anhang), ohne weitere Überlegungen für ein Hebelverhältnis von 1:1 entschieden. Da die sich später ergebende Kurvenscheibe einen „optisch ansprechenden“ Eindruck machte (keine zu starken Auswuchtungen) und später auch das sich ergebende Antriebsmoment nicht zu hoch schien, sah er keine Veranlassung, noch Variationen diesbezüglich vorzunehmen.

Student B hat demgegenüber umfangreichere Überlegungen bezüglich der Hebelverhältnisse und der daraus resultierender Kurvenscheibenkontur angestellt. Dies lag wohl auch darin begründet, dass er sich zunächst nicht mit den Tools zur Kurvenscheibenerstellung beschäftigt hat und erst einmal selbst grob die Kurvenscheibengeometrie festlegen wollte. Dies wird im Folgenden im Hinblick auf die Messerbewegung erläutert (für die Vorschubbewegung gab es entsprechende Gedanken). Abbildung 2 zeigt (als Scan aus den Unterlagen von Student B) die wesentliche Überlegung.

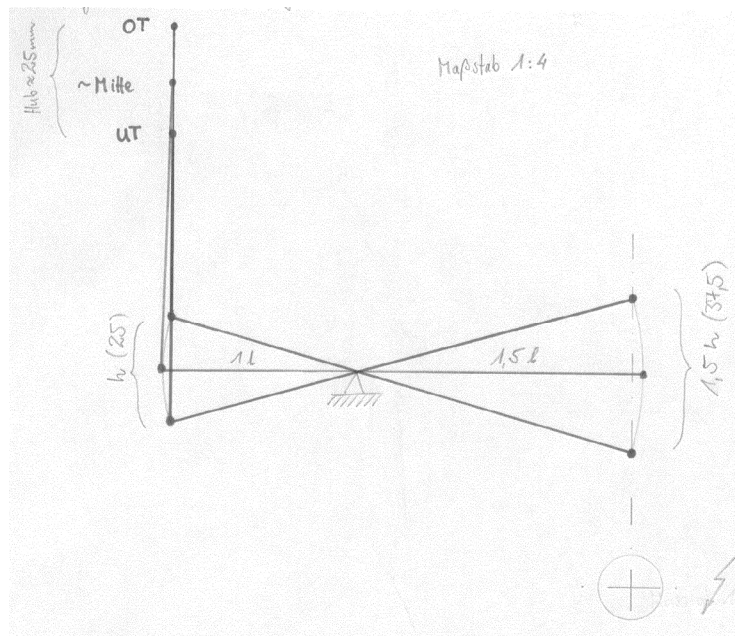


Abbildung 2: Scan des Hebelverhältnisbildes (Student B)

Er geht von einem erforderlichen Messerhub von 25 mm aus (die Öffnung ist 20mm groß, so dass dies eine akzeptable Annahme war). Er nimmt vereinfacht an, dass die Hebellagen im unteren „Totpunkt“ (in Abbildung 2: UT) und im oberen „Totpunkt“ (OT) symmetrisch zur Waagerechten liegen. Damit kann man dann – bei gegebenem Hebelverhältnis – den Hub ermitteln, den die Kurvenscheibe leisten muss. Wieder aus Einfachheitsgründen hat Student B angenommen, dass in den Extremlagen das rechte Hebelende senkrecht über dem Mittelpunkt des Steuerwellenquerschnitts liegt. Damit ließ sich – unter Vernachlässigung des Kurvenrollendurchmessers – die Kontur der Kurvenscheibe grob ermitteln, da die beiden Radien für die Rastlagen bestimmt waren. Die Rastlängen ergeben sich ja aus dem Bewegungsplan in der Aufgabenstellung. Es blieb noch die Überlegung, ob der Hebeldrehpunkt oberhalb oder unterhalb des Steuerwellenmittelpunkts angebracht sein sollte. Im ersten Fall wird der Hub durch eine „Einbuchtung“ der Kurvenscheibe (konkave Situation) erzeugt und die Messerkraft muss durch die Anpressfeder aufgebracht werden; im zweiten Fall wird der Hub durch eine „Ausbuchtung“ (konvexe Situation) hervorgerufen und die erforderliche Kraft am Abtrieb wird durch das Antriebsmoment sichergestellt (siehe Abbildung 3). Um nicht eine zu starke Feder verwenden zu müssen (gegen die am Anstieg ja auch wieder an gearbeitet werden muss), entschied sich Student B für die zweite (konvexe) Lösung.

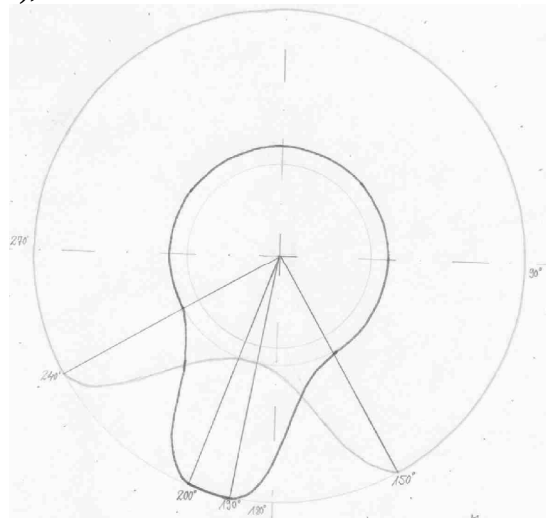


Abbildung 3: Scan der konkaven und konvexen Skizzen (Student B)

Bei der Wahl des Hebelverhältnisses stellte er zunächst eine qualitative Überlegung an, was auch durchaus sinnvoll ist, da eine Variation des Hebelverhältnisses mit nachfolgenden Analysen (neue Kurvenscheibe, neue Momentenberechnung) durchaus aufwändig ist und blinde Variation einen Effizienzverlust bedeutet. Ist der Hebeldrehpunkt weiter links, so ist das Verhältnis „besser“ im Sinne des erforderlichen Antriebsmomentes. Andererseits hat man dann auf Kurvenscheibenseiten größere Auslenkungen, die größere Scheiben erfordern (bei begrenztem Bauraum) oder steil ansteigende Kurvenflanken bewirken, was auch als Steigerung des erforderlichen Antriebsmomentes wegen schlechterer Übertragung gedeutet wurde. Auch wenn dies nicht weiter expliziert wurde, so ist diese Vorstellung doch gerechtfertigt. In der Getriebetechnik wird dieser Sachverhalt mit dem so genannten Übertragungswinkel erfasst, der möglichst „in der Nähe von 90° “ sein sollte, was bei steilem Anstieg meist nicht der Fall ist (s. Abbildung 4). Der Hebeldrehpunkt sollte möglichst tief gesetzt werden, weil wegen der festliegenden Steuerwelle die Scheibe dann nicht zu klein und damit die Steilheit des Anstiegs nicht zu groß wäre. Student B hat also qualitativ zwei entgegen gesetzte Aspekte erkannt und sich dann nach Konstruktion und Ansicht einiger Beispiele (s. Abbildung 5) für ein Verhältnis von 1:0,8 entschieden. Die „grobe“ Zeichnung basiert auf der Vorstellung des Übergangs von einem kleinen auf einen großen Radius.

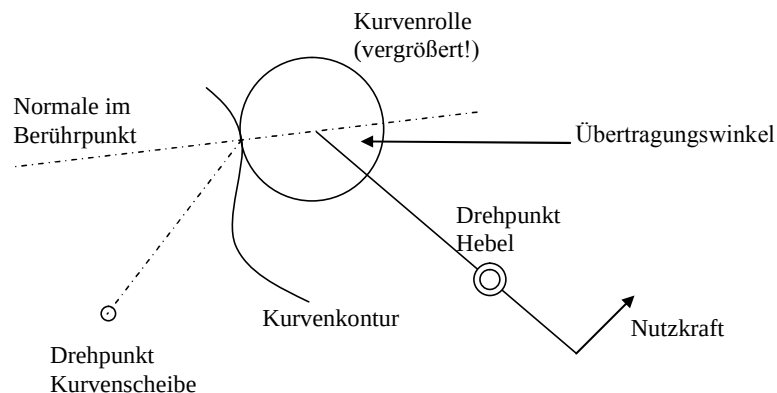


Abbildung 4: Übertragungswinkel

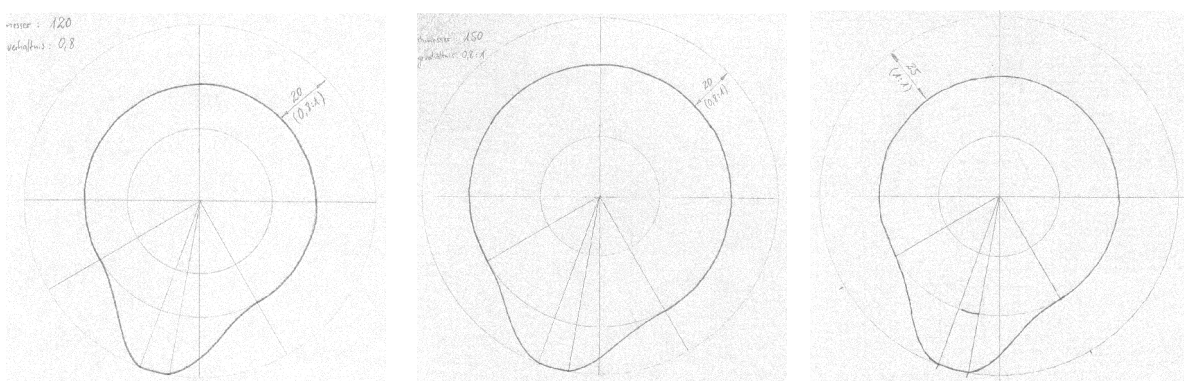


Abbildung 5: Beispelskizzen von Student B (Scan)

Die Kurvenhubberechnung erfolgt in dem vereinfachten Modell jeweils nur mit dem Strahlensatz (oder alternativ mit Trigonometrie oder Pythagoras); weitere mathematische Modellierungen sind hier nicht erforderlich.

Bei der Vorschubeinheit wäre das Argument entsprechend anzuwenden, allerdings hat Student A die Angaben missverstanden (100mm Vorschub statt 10mm), weswegen er ein Hebelverhältnis von 2:5 gewählt hat, das später noch leicht variiert wurde. Um eine Feder zu

vermeiden, hat er die Kurve als formschlüssige Nutkurve realisiert. Ferner hat Student A noch einen dritten Mechanismus integriert (ohne dass dies in der Aufgabenstellung direkt vorgesehen wäre), mit dem der Vorschieber beim Zurückfahren angehoben wird. Student B hat das Verhältnis so gewählt, dass sich derselbe Hub auf der Kurvenscheibe ergibt wie beim Messerhub, um zu ähnlichen Kurvenscheibenmaßen zu kommen.

Für die Hebelgeometrie wurde in der Aufgabenstellung ein Beispiel mit einem „Umlenkhebel“ gegeben. Student B hat sich dennoch auch Gedanken über eine direkte Lösung mit nur einem Hebel gemacht. Hierbei bräuchte er aber noch eine unelegante Langlochlösung (als Schubgelenk zur Verbindung mit dem Messerschieber) und die Lösung wäre nicht leicht veränderbar. Beim Umlenkhebel kann man über eine Gewindeschraube die Länge leicht ändern und so eventuell noch Feineinstellungen vornehmen, ohne dass man eine neue Kurvenscheibe bräuchte.

Erstellung der Bewegungsfunktionen für Messer und Vorschub

Um das Kurvenscheibenprogramm sinnvoll anwenden zu können, muss man zunächst einmal den so genannten Bewegungsplan verstehen, der als Diagramm Teil der Aufgabenstellung war. Solch ein Bewegungsplan ist ein in der Industrie übliches Mittel, um Bewegungsanforderungen und Synchronität zu spezifizieren. Er gibt an, wie die Hubbewegung am Abtrieb (Vorschub bzw. Messer) in Abhängigkeit vom Drehwinkel der Kurvenscheibe zu gestalten ist. Dabei sind gewisse Stücke der Bewegungsfunktion festgelegt (hier: die so genannten Rasten, beim Vorschub also die Bereiche 0° - 80° , 140° - 240° , 300° - 360°), die Verbindungsstücke sind noch zu erstellen, wobei Stetigkeit bis zur 2.Ableitung (Beschleunigung) zu gewährleisten ist, um Rucke und damit Schwingungsanregungen zu vermeiden. Die Nutzung des Tools wurde vom Verfasser demonstriert; in der Realität würden entsprechende Schulungsunterlagen mit Beispielen zur Verfügung stehen.

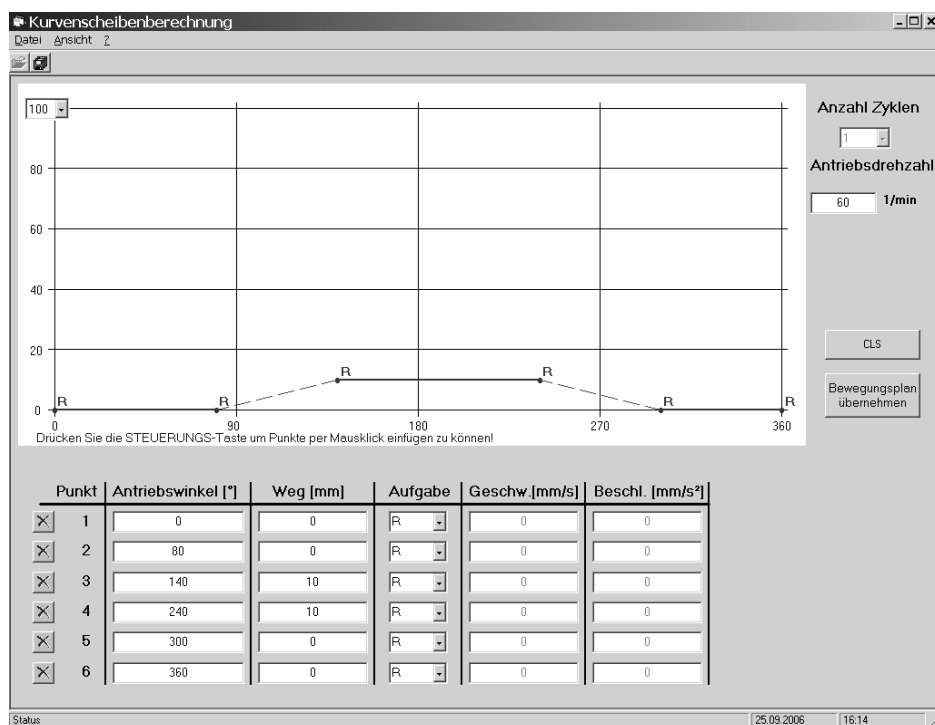


Abbildung 6: Erster Eingabebildschirm Kurvenscheibenberechnungstool

Abbildung 6 zeigt den ersten Bildschirm des Tools, der zur Eingabe eines Bewegungsplans dient. Dabei werden die Randpunkte der Abschnitte angegeben sowie die Art des Punkte (danach klassifiziert, ob Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung im Punkt gleich oder ungleich 0 sind). Bei der Aufgabenstellung handelt es sich um Rastpunkte, gekennzeichnet mit R (in der Spalte „Aufgabe“). Ferner wird noch die Antriebsdrehzahl angegeben. Bei diesem Eingabebildschirm muss man nur wissen, dass es sich bei den Abschnittspunkten um Rastpunkte handelt, da die Funktion ab dort bzw. bis dort konstant ist, und dass bei Rastpunkten Geschwindigkeit und Beschleunigung gleich 0 sind. Bei komplexeren Aufgaben (z.B. Synchronabschnitten mit konstanter Geschwindigkeit) berechnet das Tool übrigens alle aus den Eingabegrößen eindeutig berechenbaren Größen, z.B. bei Abschnitten mit konstanter Geschwindigkeit ebendiese. Zum verständigen Umgang sollte der Benutzer natürlich nachvollziehen können, welche Größen er noch selbst einzugeben hat und welche bereits eindeutig spezifiziert sind.

Für die Verbindungsstücke stehen aus einer VDI-Richtlinie (VDI 2143, 1980 bzw. 1988) unterschiedliche Funktionsarten zur Verfügung, die nach gewissen Gütekriterien zu beurteilen sind (maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung, Produkt von beidem für maximales Antriebsmoment). Für das Verständnis sind eigentlich Formelmodelle für die Leistung erforderlich, auf die weiter unten bei der Besprechung des Antriebsmoments noch eingegangen wird. In der VDI-Richtlinie werden auch Empfehlungen für gewisse Funktionsarten in bestimmten Anwendungssituationen abgegeben. Bei der Firma, aus deren Maschine die Aufgabenstellung kommt, wird nach einer Aussage in der dort durchgeführten Diplomarbeit die modifizierte Sinuslinie wegen der Ruckfreiheit verwendet. Nach Richtlinie hat diese auch den Vorteil eines niedrigen Maximalwertes der Geschwindigkeit (wichtig für erforderliches Antriebsmoment infolge einer Nutzlast, siehe theoretische Berechnung des erforderlichen Antriebsmoments) und eines niedrigen Maximalwertes des Produkts aus Geschwindigkeit und Beschleunigung (wichtig für erforderliches Antriebsmoment infolge hoher Trägheitskraft am Abtrieb). Dies dürfte für die Firma auch wesentlich gewesen sein, um dieses Bewegungsgesetz auszuwählen. Die symbolische Darstellung in normierter Form (Hub von 1 im Intervall [0,1]) lautet:

$$f(z) = \begin{cases} \frac{\pi}{4+\pi} \cdot \left(z - \frac{1}{4\pi} \sin(4\pi z) \right) & \text{für } 0 \leq z \leq \frac{1}{8} \\ \frac{\pi}{4+\pi} \cdot \left(\frac{2}{\pi} + z - \frac{9}{4\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}(1+4z)\right) \right) & \text{für } \frac{1}{8} \leq z \leq \frac{7}{8} \\ \frac{\pi}{4+\pi} \cdot \left(\frac{4}{\pi} + z - \frac{1}{4\pi} \sin(4\pi z) \right) & \text{für } \frac{7}{8} \leq z \leq 1 \end{cases}$$

Wollte man damit direkt arbeiten, so müsste man aus dieser normierten Darstellung die Einpassung (Streckung in x- und y-Richtung, Verschiebung in x-Richtung) algebraisch bestimmen und käme so zu einem Funktionsstück. Die Stücke müssten dann zur Gesamtfunktion zusammengesetzt werden und noch durch die Substitution *Winkel* = (Drehzahl/60)*Zeit (in Sekunden) umgerechnet werden. Sowohl die Erstellung und die damit zusammenhängenden Gleichungen als auch die rechnerische Anwendung auf den konkreten Bewegungsplan sind für den Tool-Benutzer in der Richtlinie bzw. dem Tool verborgen.

Bei der Projektaufgabe wurde den Studenten die modifizierte Sinuslinie bereits vorgegeben und damit die Situation nachgebildet, dass diese Funktion in der Firma formal oder informell (über Kollegenfrage) in der „Regel“ genommen wird. Interessant ist natürlich auch die Frage, welche Qualifikation für eine sinnvolle Auswahl erforderlich wäre: Dies wären Vorstellungen von Stetigkeit, auch in Ableitungen, und von der Bedeutung der Kennwerte, wie sie aus der Berechnung des Antriebsmoments bzw. aus praktischer Erfahrung (Schwingen bei

plötzlichem Ruck) zu erhalten wären. Die oben angegebenen algebraischen Ausdrücke und ihre Entstehung braucht man sicherlich als „normaler“ Nutzer nicht zu kennen, während ein Weiterentwickler, dem die zur Verfügung stehenden Bewegungsgesetze nicht ausreichen, sehr wohl über deren Entwicklung Bescheid wissen müsste, um eigene Gesetze aufzustellen. Abbildung 7 zeigt den zweiten Eingabebildschirm. Hier müssen die Übergangsgesetze für die noch unbestimmten Abschnitte eingegeben werden. An dieser Stelle ist nur das vorgegebene Gesetz auszuwählen. Das Programm zeigt dann den Übergang.

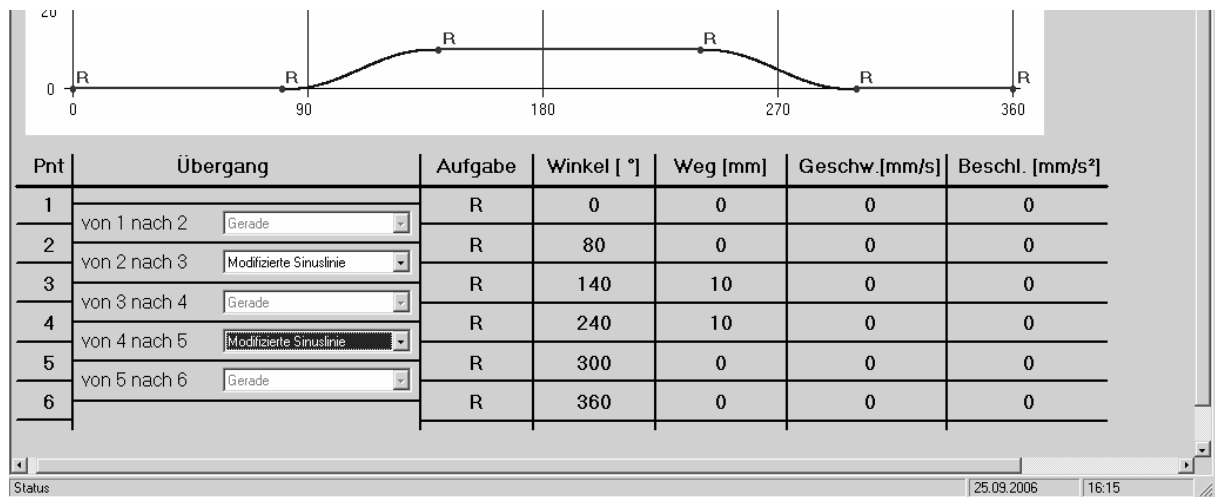


Abbildung 7: Zweiter Eingabebildschirm Kurvenscheibenberechnungstool

Das Tool liefert auch die Kennwerte (Abbildung 8) und Funktionsverläufe der Ableitungen. Für die Aufgabenstellung werden diese zwar nicht unmittelbar benötigt, bei einer überschlägigen Berechnung des benötigten Antriebsmoments und zur Überprüfung der Eingaben in Pro/Engineer sind sie jedoch sehr nützlich, was weiter unten noch konkreter dargelegt wird. Zum Verständnis der Kennwerte sollte man sie als Extrema entsprechender Funktionen deuten können; später wird auch interessant, wo diese Extrema auftreten. Bei den Extremwerten vom Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung sollte klar sein, dass man nicht einfach die Extrema der einzelnen Funktionen miteinander multipliziert. Beim hier nicht relevanten Entwurf von Bewegungsgesetzen müsste man natürlich noch mehr über die Trade-Off-Effekte bei der Verringerung von Geschwindigkeit einerseits und Beschleunigung andererseits wissen.

Nach Aussage der Studenten war die Bedeutung des Bewegungsplans, der vom Verfasser erläutert wurde, klar. Auch war ihnen bewusst, dass die linearen Übergänge nur zur Veranschaulichung dienen, aber nicht real sein konnten, da Knicke nicht möglich sind. Vielleicht ist der häufige Umgang mit stückweise definierten Funktionen im Studium dafür verantwortlich, dass hier keine Verständnisschwierigkeiten auftreten. Die Umrechnung auf eine Weg-Zeit-Funktion mithilfe der Drehzahl bereitete ebenfalls keine Verständnisschwierigkeiten, so dass am Ende eine tabellarisch gegebene Weg-Zeit-Funktion für das Messer bzw. den Vorschub als Output geliefert wird (Abbildung 9). Ferner war auch klar, dass die vom Tool gelieferte Kurvenscheibe nicht nutzbar war, da diese die Bewegung direkt am Stößel oder Hebel liefern würde, während man in der Anwendung die Bewegung (über einige Hebel übertragen) am Messer bzw. Vorschub haben will. Hier bestünde ansonsten auch noch eine Möglichkeit der Fehlinterpretation.

In der ursprünglichen Fassung des Tools wurden in der Datentabelle die Werte auf drei Nachkommastellen gerundet. Dies führte zu deutlich verfälschten (oszillierenden) Beschleunigungsfunktionen in Pro/Engineer, weswegen im Tool die Rundung entfernt wurde

(siehe Abbildung 9). Auf dieses Problem wird weiter unten bei der Besprechung der Nutzung von Pro/Engineer noch eingegangen.



Abbildung 8: Kennwerte

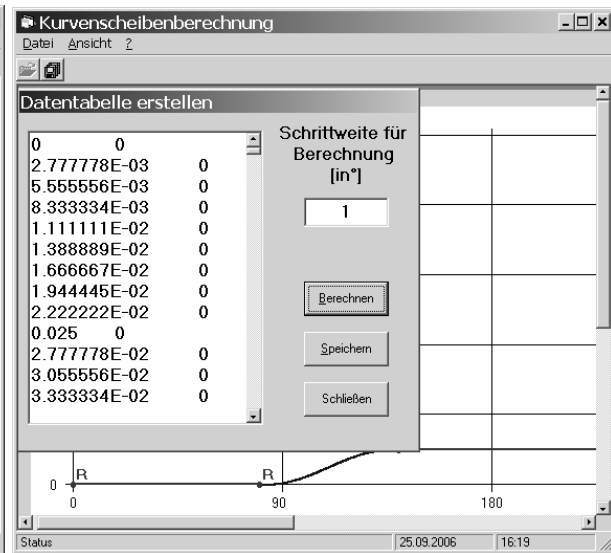


Abbildung 9: Tabellenausgabe

Erstellung der Kurvenscheibengeometrie

Um die Kurvenscheibengeometrie zu erstellen, muss zunächst einmal der Mechanismus bis hin zur Kurvenscheibe (inklusive Kurvenrolle) in Pro/Engineer konstruiert sein. Dann gibt man für den Abtrieb (Messer bzw. Vorschub) die gewünschte Bewegungsfunktion ein, wie sie mit dem Kurvenscheibentool vorher tabellarisch erstellt worden ist, wobei es sogar noch andere Eingabemöglichkeiten (inklusive symbolischer) gibt, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird. Man kann nun den Mechanismus mit dem Abtrieb als Antrieb laufen lassen und dabei die Spurkurve des Kurvenrollenmittelpunktes („Spurkurventool“) oder andere Größen wie Abstände aufzeichnen lassen, die später für die Erstellung der Kurvenscheibenkontur benötigt werden. Student A hat zwei Möglichkeiten genutzt, die Kontur zu berechnen (Spurkurve und Abstände bzw. Winkel), die beide im Folgenden noch besprochen werden. Bei der Nutzung des Spurkurventools ist darauf zu achten, dass auch das so genannte „Papierteil“ (Scheibe auf der Steuerwelle), auf der die Kurve abgetragen wird, mit konstanter Geschwindigkeit rotiert, da man sonst nur die Hebelkurve als Kreisausschnitt erhält. In jedem Fall bekommt man zunächst nur die Spur des Rollenmittelpunktes und muss zum Erhalt der Kurvenscheibenberandung noch die Offset-Kurve mit dem Rollenradius als Offset bilden.

Student A hat zunächst sogar versucht, die Kurvenscheibengeometrie symbolisch zu berechnen, dies dann aber als zu kompliziert aufgegeben, da ja auch das Tool vorhanden war. Im Folgenden soll näher eingegangen werden auf

- die Eingabe der Bewegungsfunktion
- mathematikrelevante Probleme beim Erstellen der Spurkurve
- mathematikrelevante Probleme beim Erstellen der Kontur über Messungen.

Pro/Engineer stellt für die Eingabe einer Bewegungsfunktion das in Abbildung 10 (a) dargestellte Interface zur Verfügung. Man kann Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung als zeitabhängige Funktion eingeben. Die Bewegungsfunktion kann auf dreierlei Weise spezifiziert werden:

- tabellarisch, wie in diesem Fall geschehen (siehe Abbildung 10 (a); hier wird die Tabelle über eine Datei eingelesen);
- als Funktion einer von insgesamt 7 zur Verfügung stehenden Funktionsklassen (Abbildung 10 (b)); die Funktionen haben noch gewisse Parameter/Koeffizienten, die numerisch zu spezifizieren sind (beim Polynom 3. Grades 4 Koeffizienten, siehe Abbildung 10 (c));
- als benutzerdefinierte stückweise symbolisch gegebene Funktion (Abbildung 10 (d)), wobei der Benutzer die Teilausdrücke und die Teilintervalle spezifiziert.

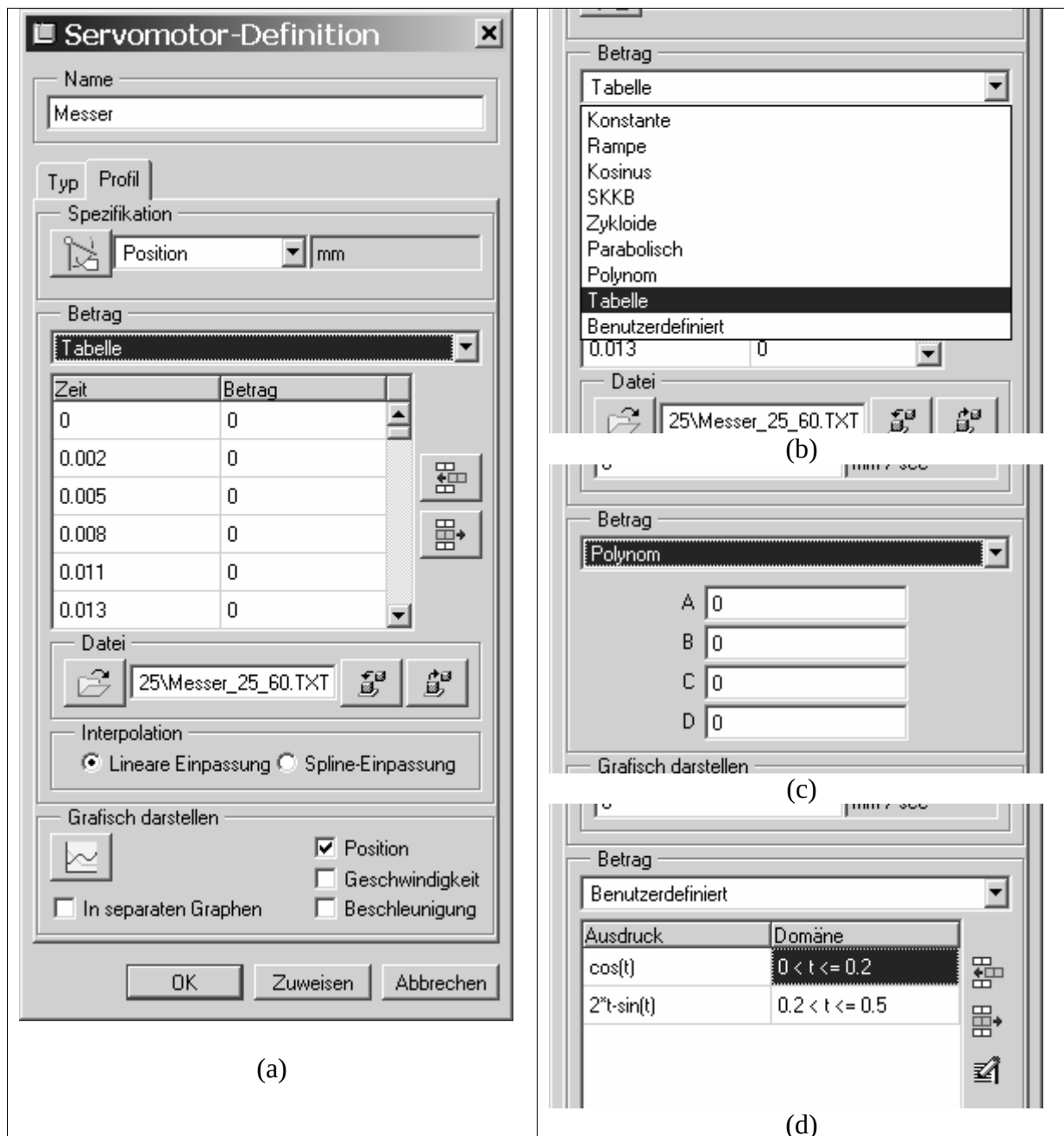
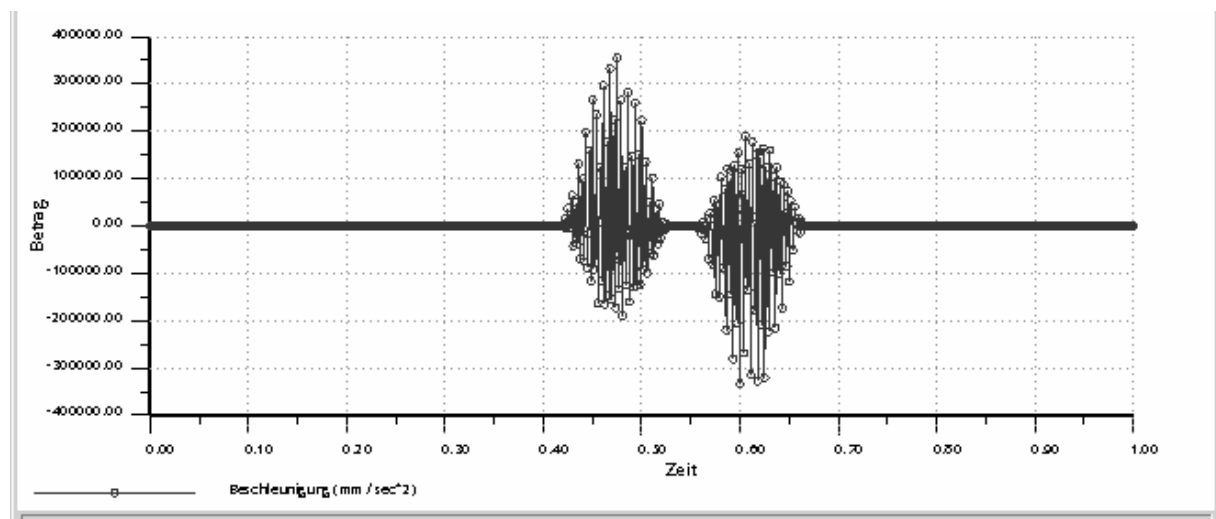


Abbildung 10: (a) Gesamtfenster (b) Auswahl an Funktionen (c) Parametereingabe für Polynom (d) Eingabe stückweise symbolischer Funktionen

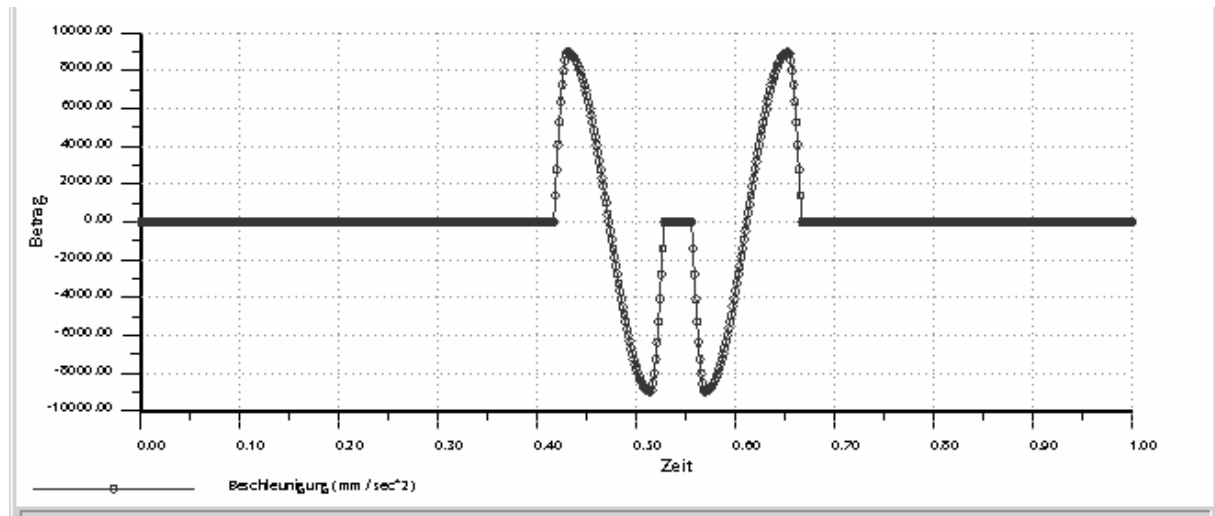
Man könnte also im Falle der vorliegenden Aufgabenstellung auch direkt die Funktionsstücke eingeben, wenn man Sie vorher auf Basis der VDI-Richtlinie per Hand oder mit einem Tool (vgl. Alpers/Steeb, 1998) berechnet hätte. In der Regel dürfte der Benutzer aber – wie hier auch geschehen – mit einer durch ein anderes Programm berechneten Tabelle arbeiten. Gerade wenn es zu fragwürdigen Ergebnissen oder Situationen kommt, wie sie weiter unten noch dargelegt werden, ist es aber zum Prüfen und Finden möglicher Fehler durchaus nützlich, wenn man mehrere Vorgehensweisen beherrscht und sehen kann, ob man gleiche Ergebnisse erhält.

Bei der Eingabe der Bewegungsfunktion als Tabelle ist noch zu entscheiden, ob man eine lineare oder eine Splineinterpolation vornehmen sollte. Dazu muss man natürlich wissen, welches Verhalten man modellieren möchte, insbesondere ob – von der Anwendung her – ein glatter Verlauf angemessen wäre. Da die Punkte sehr nahe beieinander lagen, ist der Unterschied wohl nicht so groß. Es ist allerdings nicht klar, bei welchen Berechnungen dies eingeht (bei der direkten Darstellung von Geschwindigkeit und Beschleunigung ist ein Spline erforderlich). Wenn sowieso nur positionsweise gerechnet wird, ist wohl der wesentliche Punkt, in welchen diskreten Abständen gerechnet wird. Es wurde ein Spline gewählt, um sicher einen glatten Punktdurchgang zu erhalten.

Schließlich kann man sich Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung auch graphisch anschauen und so überprüfen, ob sich die vorgestellten Verläufe ergeben. Man kann diese auch mit den Verläufen im Kurvenscheibentool vergleichen. Bei der Diskussion und Überprüfung der studentischen Arbeiten wurde dies genutzt, als sich später bei der Drehmomentbestimmung ein Verlauf mit nicht erkläraren Ausschlägen ergab. In solch einer Situation ist es immer ratsam zu überprüfen, ob der Bewegungsinput überhaupt in Ordnung ist. Beim Plot der Beschleunigung der Messerbewegung wurde dabei festgestellt, dass dort bereits ein eigentlich nicht vorhandenes Oszillieren auftritt, wie dies in Abbildung 11(a) dargestellt ist. Dies kommt dadurch zustande, dass – wie oben dargelegt – die erste Version des Kurvenscheibentools nur Ausgabewerte mit einer Genauigkeit von 3 Nachkommastellen lieferte, was hier offenbar zu grob war. Nachdem dies umprogrammiert worden war, ergab sich der glatte Verlauf aus Abbildung 11(b). Dies zeigt, dass ein flexibler Umgang mit dem Tool, der alle zur Verfügung stehenden Daten nutzt und deren Zusammenhänge versteht (hier der Ableitungszusammenhang zwischen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung), ausgesprochen hilfreich ist beim Finden von Fehlerursachen. Das Beispiel illustriert auch, dass man in das vorhandene Tool nicht einfach irgendwelche vordergründig akzeptablen Daten einspeisen kann, sondern dass man sich gerade bei der Darstellung von Funktionen der Beschränkungen gewisser Repräsentationstypen bewusst sein sollte.



(a)



(b)

Abbildung 11:
Beschleunigungsfunktion Messerhub (a) ungenaue Eingabe (b) genaue Eingabe

Student B hat nicht nur – wie oben dargelegt – die Hebelgeometrie zeichnerisch und rechnerisch überschlagen, sondern auch grob die sich ergebenden Kurvenscheiben skizziert, indem er die Rastphasen als Teilkreise (über Winkeln nach dem Bewegungsplan) gezeichnet und dazwischen näherungsweise per Hand interpoliert hat. Dieses Vorgehen hat er auch in Pro/Engineer realisiert, indem er die Skizzierebene für den Kurvenscheibenquerschnitt mit einigen senkrechten Ebenen geschnitten hat, so dass die Schnittgeraden just die relevanten Winkel aus den Bewegungsabschnitten einschlossen und dann die Teilkreise gezeichnet werden konnten. Zwischen den Kreisbögen hat er mit einer Splinekurve interpoliert, dabei aber nur „optisch“ Tangentialstetigkeit hergestellt und manchmal auch zusätzlich ausgerundet. Dies liefert natürlich eine in der Praxis nicht akzeptable Näherung, bot aber eine grobe Kontrollmöglichkeit für die Berandungskurve, die mit dem Spurkurventool erzeugt wurde. Beim Vergleich der händischen Konstruktion mit der mit dem Spurkurventool erzeugten Kurve zeigt sich bei der Kurvenscheibe für die Messerbewegung eine deutlich Abweichung im oberen Rastbereich (in den Übergangsbereichen sind die Kurven natürlich wegen der groben händischen Konstruktion unterschiedlich): Die mit dem Spurkurventool und der Offsetbildung bestimmte Kontur macht überhaupt keine Rast, wie in Abbildung 12 deutlich zu sehen ist. Dies konnte im Interview mit Student B, in dessen Verlauf er die Entstehung in Pro/E demonstrierte, nicht geklärt werden.

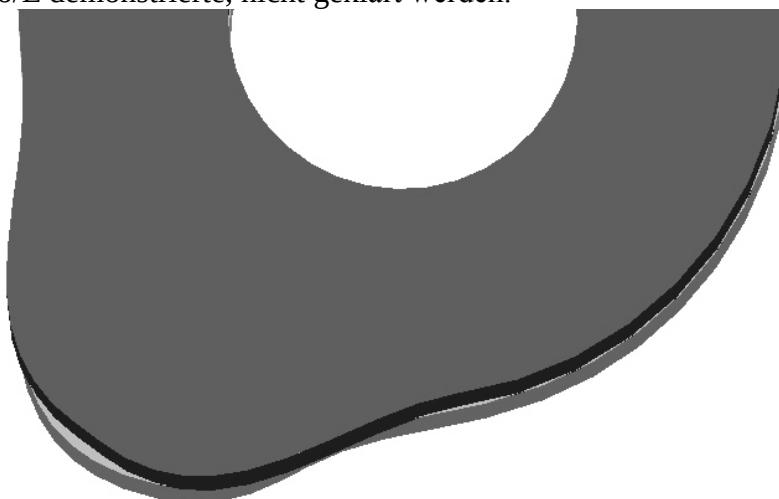


Abbildung 12: Kurvenscheibe mit Hand (oben) bzw. Tool (unten) erstellt

Eine spätere genaue Untersuchung durch den Verfasser hat gezeigt, dass die Spurkurve mit Hilfe einer Bewegungsanalyse erstellt wurde, die nur auf 25 Bildern beruhte, d.h. alle 14.4° wurde ein Bild erstellt (und damit eine Positionsrechnung). Durch diese Punkte wird dann eine Splinekurve gelegt. Da die Rast beim Messer aber nur eine Länge von 10° hat, wurde durch die Interpolation bei grober Punktebasis die Rast „ausgerundet“. Die vom Verfasser erzeugte Abbildung 13 zeigt übereinander die Spurkurven mit 25 und mit 1000 Bildern und die zugehörigen Offsetkurven. Bei den Spurkurven sieht man noch deutlich die gemeinsamen Punkte in gleichem Winkelabstand von 14.4° . Durch das Bilden der Offsetkurve werden die gemeinsamen Punkte noch in unterschiedliche Richtungen verschoben, so dass der Interpolationsfehler nicht mehr so offensichtlich ist. Erst ein Verständnis des Zustandekommens der Spurkurve und der Interpolationsproblematik kann also die Problemsituation lösen. Student B hat auch noch eine weitere Variante beim Spurkurventool ausprobiert, die Verfolgung von Kurven und Berechnung der Einhüllenden. Er hat dies auf die Laufrolle angewendet (genauer: deren Rand) und gesehen, dass sich dasselbe Problem ergibt. Im Durchgang mit dem Verfasser wurde die Äquidistanzeigenschaft überprüft (Abstand zwischen Kurven messen in Pro/Engineer) und gesehen, dass diese verletzt wird, was wiederum der Realität widerspricht.

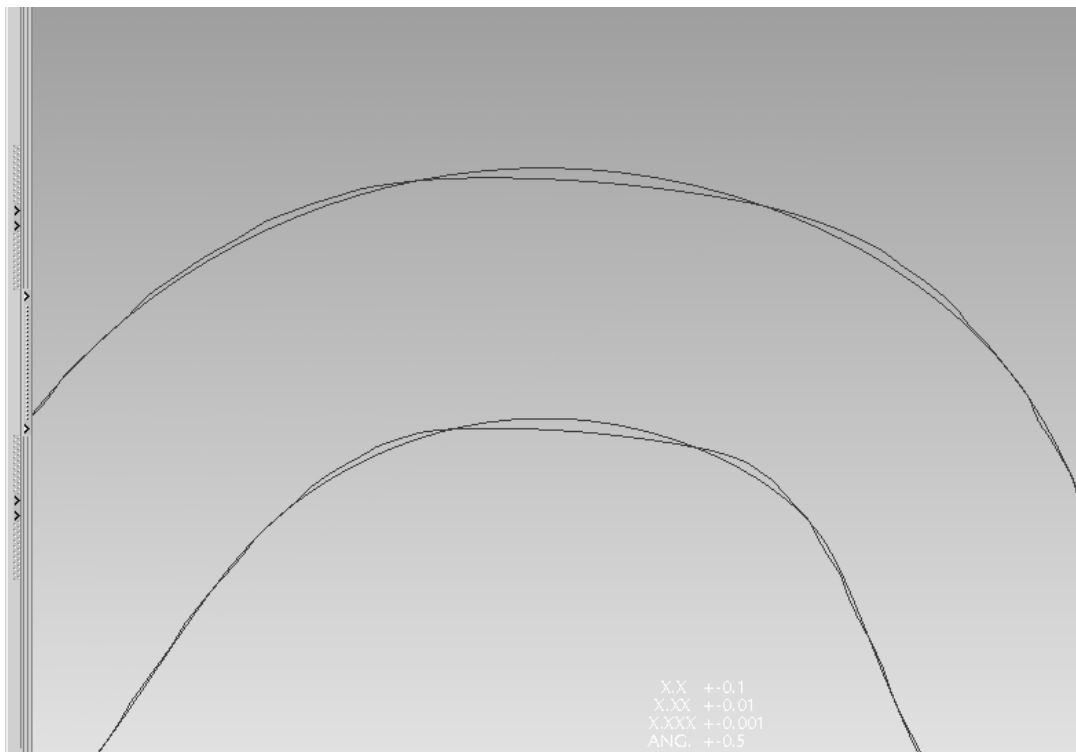


Abbildung 13: Rollenmittelpunktsbahn und Offsetkurve als Spline mit 25 bzw. 1000 Bildern

Da die Rast beim Vorschub 100° beträgt, liegen selbst bei 25 Bildern einige im Rastbereich, so dass hier die Rast gut modelliert wurde. Dies machte die Sachlage natürlich auf den ersten Blick unverständlicher, weil das Problem bei einer Scheibe auftrat und bei der anderen nicht. Es handelt sich hier um eine typische Problemsituation, in der das vom Tool gelieferte Ergebnis nicht mit dem erwarteten übereinstimmt und eine genauere Untersuchung des mathematischen Zustandekommens des Ergebnisses erforderlich ist. Es zeigt sich auch wieder, dass eine Überprüfung des Ergebnisses anhand elementarer Geometriekenntnisse fehlerhafte Nutzung zumindest erkennbar macht. Der Ansatz von Student B, das Ergebnis des Spurtools unter Nutzung der groben Handkonstruktion auf Plausibilität zu überprüfen, ist

sicher sinnvoll. Man könnte auch die Spurkurve nehmen und über eingezeichnete Kreise die Rastbereiche grob prüfen (dazu muss man natürlich wissen, dass man Kreisbögen zu erwarten hat!). Der Verfasser selbst hat gesehen, wie leicht man auch für die Spur in einer komplexeren Konstruktion den falschen zu verfolgenden Punkt greift, so dass hier allein wegen der Anfälligkeit gegen Fehler ein gutes Verständnis des zu Erwartenden nützlich ist.

Schließlich hat Student A noch vor der „Entdeckung“ des Spurkurventools die in Pro/Engineer zur Verfügung stehenden metrischen Analysetools zur Abstands- und Winkelmessung genutzt, um alternativ die Kurvenkontur zu ermitteln: Man muss zunächst Ebenen einfügen, zu denen der Abstand des Kurvenrollenmittelpunktes gemessen werden soll. Diese müssen senkrecht zur Skizzierebene für die Kurvenscheibe liegen und deren Koordinatenachsen schneiden. Man lässt die Ebenen auch rotieren und erhält damit gleich die richtigen Koordinaten. Da aber nur (positive) Abstände gemessen werden, muss man noch nachträglich die Vorzeichen korrigieren. Alternativ kann man auch Abstand vom Ursprung und Winkel messen und damit Polarkoordinaten erhalten (siehe Abbildung 14). Allerdings werden bei den Winkeln nur positive Winkel zwischen 0° und 180° gemessen, so dass man auch hier wieder eine Korrektur vornehmen muss. Der Winkel wächst nicht linear (obwohl das Koordinatensystem mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gedreht wird), weil die Kurvennormale in den Übergangsbereichen nicht durch den Kurvenscheibenmittelpunkt geht. Student A hat diese leichte Nicht-Linearität festgestellt (in Abbildung 14 rechts kaum zu erkennen), ohne genau die Ursachen zu kennen. Da er in ihr kein Problem sah, ist er den Ursachen auch nicht auf den Grund gegangen. Insgesamt ist natürlich eine Alternativmöglichkeit (neben dem Spurkurventool) immer gut, gerade wenn ein Problem wie das oben geschilderte auftritt.

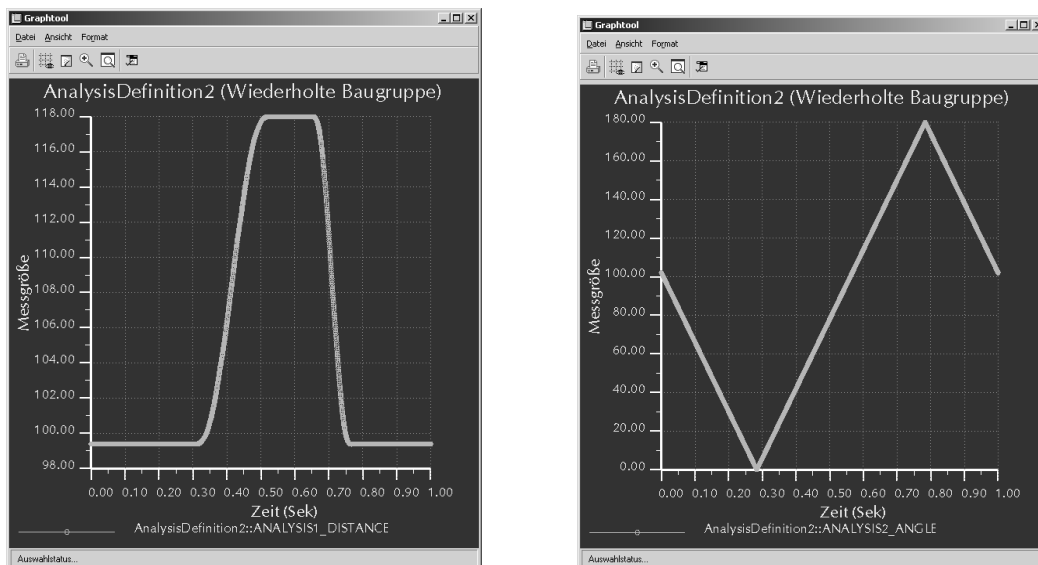


Abbildung 14: Abstands- und Winkelmessung

Nach der Anwendung des Analysetools hat Student A die Offsetkurve gebildet. Hierbei ergab sich eine „wellige“ Kurvenkontur. Pro/Engineer konnte keine Bewegungssimulation mehr erstellen (kein „Abspielen“), was daran liegt, dass die Laufrolle aus Krümmungsgründen die Wellen nicht mehr abfahren kann. Das Problem ließ sich umgehen, indem Student B bei der Erstellung der Bewegungsfunktion im Kurvenscheibentool eine größere Schrittweite wählte (2° statt 0.5°), was natürlich auch zu einer gröberen Darstellung der gewünschten Bewegung führt. Die eigentliche Ursache für die entstehende Welligkeit lag aber in der oben bereits dargelegten Ungenauigkeit des tabellarischen Outputs der ursprünglichen Version des Kurvenscheibentools, die auf nur drei Nachkommastellen gerundet hat. Dies resultierte bei

vielen Punkten in einer Welligkeit mit kurzer „Wellenlänge“. Mit der neuen genaueren Version ergab sich das Problem auch bei hoher Punktzahl (Schrittweite 0.5°) nicht mehr.

Entwurf der Federn

Zur Auslegung der Feder bietet Pro/Engineer die Eingabe zweier Größen: die Länge im entspannten Zustand (dadurch implizit: Vorspannung) und die Federkonstante (Abbildung 15). Die Auslegung muss so erfolgen, dass der Hebel nicht von der Kurvenscheibe abhebt. Andererseits sollte die Federkraft nicht zu groß sein, da dies das erforderliche Antriebsmoment erhöht (außerdem: Lagerbelastung). Student A hat zunächst grob angesetzt und dann gesehen, dass die Rolle abhebt. Er ist von 100 auf 1000 N/m (Angabe in Pro/E: kg/s²) gegangen, was ausreichte. Student A hat aus seiner Erfahrung heraus schon eine gewisse Vorstellung von den Werten. Bei einer realistischen Konstruktion würde man hier wohl genauer arbeiten.



Abbildung 15: Federdefinition

Bestimmung des Antriebsmoments

Bei der Berechnung des notwendigen Antriebsmoments hat sich Student A allein auf die Möglichkeiten von Pro/Engineer gestützt, während Student B nicht mehr zur Nutzung von Pro/Engineer gekommen ist, dafür aber überschlägige Rechnungen per Hand für verschiedene Hebelverhältnisse und sich dabei ergebende Kurvenscheibengrößen gemacht hat. Im Folgenden werden zunächst die mathematikrelevanten Aspekte der Pro/Engineer-Nutzung durch den Studenten A vorgestellt und es wird dargelegt, wie man mit einem Überschlagsmodell die Resultate prüfen, Fehlerquellen finden und den Einfluß der eingehenden Größen abschätzen kann, was für das zielgerichtete Variieren von Bedeutung ist. Dann untersuchen wir das Überschlagsmodell von Student B und zeigen, wie mit einer symbolischen Modellierung die Variation effizienter und effektiver gemacht werden kann.

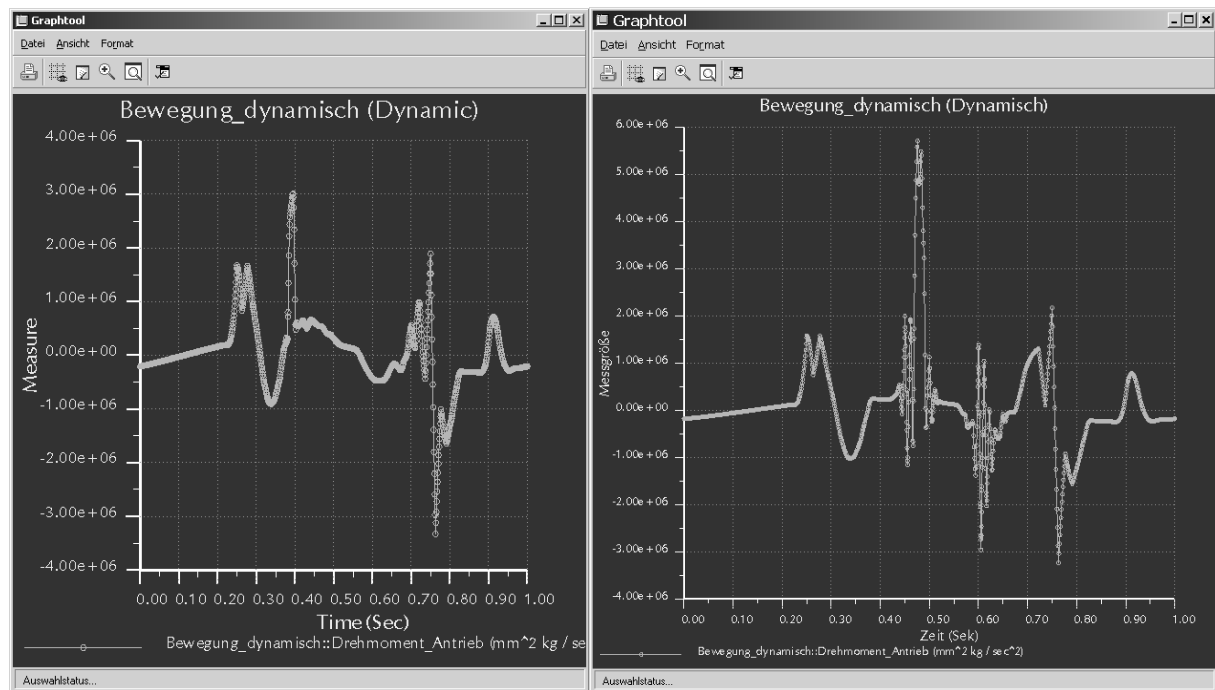
Für die Bestimmung des erforderlichen Antriebsmoments an der Steuerwelle steht in Pro/Engineer die Applikation „Mechanismus“ zur Verfügung. Dafür müssen die beteiligten Körper und ihre Verbindungen (Gelenke) definiert werden, wobei vorher erstellte Konstruktionselemente referenziert werden können. Ferner sind Federn, Dämpfer, externe Kräfte und Momente, Gravitation, Antriebe und Anfangsbedingungen je nach Anwendungssituation festzulegen. Student A hat als angetriebenen Körper die Kurvenscheibe gewählt mit konstanter Winkelgeschwindigkeit (60 Umdrehungen/Minute, also 360°/s). Die Eingabe-

möglichkeiten sind hier dieselben, wie sie oben in Abbildung 10 bei der Erstellung der Kurvenscheibe mit dem Spurkurventool bereits beschrieben wurden. Ferner hat er die Federn wie oben angegeben spezifiziert, die Gravitation vektoriell mit Betrag und Richtung (bezogen auf das globale Koordinatensystem) angegeben und eine Startsituation festgelegt. Die richtige Wahl der Ausgangssituation bei der Analyse ist wichtig, da sonst falsche Ergebnisse zustande kommen. Liegt z.B. die Kurvenrolle am Anfang nicht an, so „fällt“ die Rolle durch die Federkraft zunächst einmal auf die Kurvenscheibe. Dies führt natürlich zu einer falschen kinematischen und dynamischen Analyse.

Bei der Eingabe der Kraftfunktion für das Messer sind der Angriffspunkt (Referenz auf existierenden Punkt in der Konstruktion), der Richtungsvektor und der Betrag anzugeben. Die Eingabe der Betragsfunktion ist dieselbe wie bei den Bewegungsfunktionen (tabellarisch, vorgegebene oder benutzerdefinierte Funktionen). In Absprache mit dem Anwendungskollegen wurde eine erforderliche Schnittkraft von 100N festgelegt. Dann war die zugehörige zeitabhängige Kraftfunktion zu spezifizieren. Student A hat dies auch anhand einer Datentabelle vorgenommen, indem er die ursprüngliche Datentabelle für die Messerbewegung genommen und die Wegangaben durch Kraftangaben ersetzt hat. Es stellt sich die Frage, wann die Kraft einsetzen soll, da dies in der Aufgabenstellung nicht genau festgelegt ist. Student A hat ein frühes Einsetzen des Schnittvorgangs kurz nach Beginn der Hubphase angenommen. Realistischer von der Anwendung her wäre ein Einsetzen bei hoher Messergeschwindigkeit, also eher in der Mitte der Hubphase, da dann ein sauberer Schnitt zu erwarten ist. Zudem hatte Student A zunächst mit einer fehlerhaften Hubfunktion gerechnet, die zwar die korrekte Hubhöhe, aber einen unsymmetrischen Hubverlauf vorsah (in der Spezifikation sind sowohl für den Hub als auch für das Absinken je 40° vorgesehen). Fehler oder fragwürdige Annahmen, die hier gemacht werden, sind später nicht leicht zu erkennen, insbesondere wenn es sich nicht um Auswirkungen handelt, die zu anderen Größenordnungen führen. Dies war hier gerade der Fall, da die Analyse von Student A zu einem erforderlichen Drehmoment von ca. 3Nm führte, während die „angemessene“ Analyse ca. 6Nm ergibt. Letzteres Resultat liefert auch eine überschlägige Rechnung im Leistungsbilanzmodell, was den Verfasser erst zur Infragestellung und näheren Betrachtung der ursprünglichen Analyse von Student A motivierte. Auf das Modell wird weiter unten näher eingegangen.

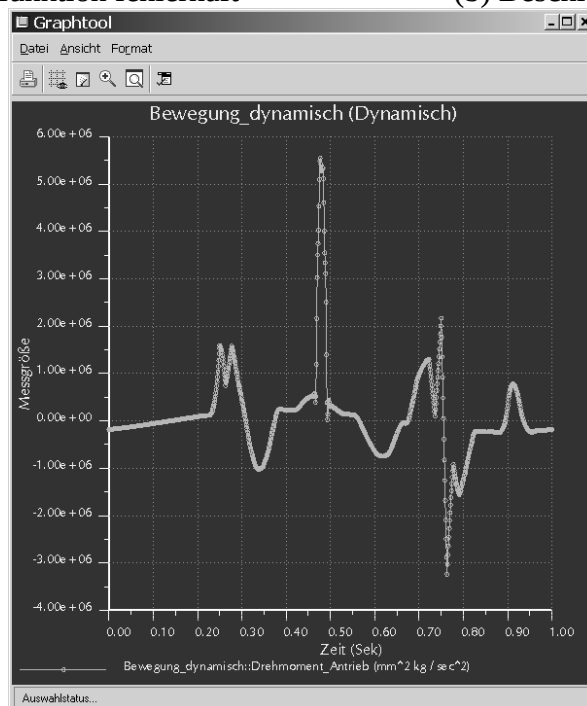
Beim tabellarischen Aufbringen der Schnittkraft kann wieder zwischen linearer und Splineinterpolation gewählt werden. Hier wäre die lineare angemessen, da die Schnittkraft eher sprunghaft ansteigt, während die Splineinterpolation den sprunghaften Anstieg nicht richtig modellieren kann und nach unten und oben ausschwingt. Student A hat die Schnittkraft zwar nicht sprungartig ansteigen lassen, ist aber in 3ms-Schritten von 0 auf 50, 70 und schließlich 100N gegangen, was einem sehr kurzen „Eindrücken“ vor dem eigentlichen Schneiden entspricht. Man könnte dies auch alternativ durch Aufstellung einer stückweise definierten Funktion durchführen. Hier zeigt sich, dass Anwendungswissen in mathematische Repräsentation umzusetzen ist, wobei das Anwendungswissen natürlich ohne genauere experimentelle Untersuchung des Schnittvorgangs auf Annahmen beruht.

Die Outputdaten der Analysen stehen tabellarisch und graphisch zur Verfügung und müssen interpretiert werden. Dies dient auch dazu, eventuelle Fehler zu finden. Abbildung 16 zeigt den graphischen Output der Drehmomentanalyse von Student A bei den Analysen mit fehlerhaftem und korrektem Input. Bild (a) zeigt, dass das frühzeitige Einsetzen und Abnehmen der Schnittkraft zu einem geringeren Spitzenmoment führt. In Bild (b) erkennt man das Oszillieren der Momentenfunktion aufgrund der fehlerhaften Oszillation der Messerbeschleunigung (vgl. Abbildung 11(a)), die auf der ungenauen Eingabe basiert. Bild (c) liefert schließlich bei korrekten und genauen Inputdaten ein Spitzenmoment von knapp 6Nm und das Oszillieren ist verschwunden.



(a) Kraftfunktion fehlerhaft

(b) Beschleunigung fehlerhaft



(c) korrekte Inputdaten

Abbildung 16: Antriebsmoment fehlerhaft bzw. korrekt

Beim der Interpretation des Drehmomentgraphen ist zu klären, was die Vorzeichen und Vorzeichenwechsel bedeuten und wie die Ausschläge zustande kommen. Die negativen Momente bedeuten, dass die Kurvenscheibe in ihrer Drehung unterstützt wird, etwa durch Feder- oder Gravitationskräfte bei rückläufiger Kurvenflanke. Der steile positive Anstieg ist auf das Einsetzen der Schneidkraft zurückzuführen. Dieser erfolgt – wie besprochen – im linken Graphen in Abbildung 16 verfrüht. Zur Interpretation muss man den Drehmomentgraphen vergleichen mit dem Kraftverlaufsgraphen und dem Bewegungsgraphen des Messers und der anderen Mechanismen, d.h. eine simultane Betrachtung der Graphen ist erforderlich.

Um allein den Einfluss der Messerbewegung und Messerkraft zu untersuchen, wäre ein Abkoppeln der anderen Mechanismen sinnvoll.

Will man nach Ermittlung des erforderlichen Drehmoments die Bewegungsfunktion für das Messer oder die Hebelgeometrie variieren, so muss man zunächst eine neue Bewegungsfunktion erstellen und mit dem Spurkurventool die Umrandungskurve (genauer die Äquidistante) der Kurvenscheibe neu erzeugen. Die Nutzung der dynamischen Analyse kann je nach gewählter Genauigkeit (Anzahl der „Bilder“, d.h. Schrittweite) auch recht lange dauern, etwa fünf Minuten bei 1000 Bildern. Daher wäre ein Variieren anhand eines groben Leistungsmodells und der Kennzahlen des Bewegungsgesetzes deutlich effizienter. Dies wird im Folgenden vorgestellt.

Nach (Vollmer, 1989, S. 153) kann das erforderliche Antriebsmoment über eine Leistungsbilanz der Form „*Antriebsleistung* = *Abtriebsleistung* + *Verlustleistung*“ bestimmt werden, wobei man die Verlustleistung vernachlässigt und so einen grobe Abschätzung nach unten erhält. Da die Leistung bei Rotationsbewegungen das Produkt aus Moment und Winkelgeschwindigkeit und bei Translationen das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit ist, hat man formelmäßig:

$$M_{an} \cdot \omega_{an} = -F_{ab} \cdot v_{ab} \quad , \text{ also } M_{an} = \frac{-F_{ab} \cdot v_{ab}}{\omega_{an}} .$$

Die Kraft am Abtrieb setzt sich zusammen aus Nutzkraft F_N , Trägheitskraft F_T , Federkraft F_F und Schwerkraft F_S (Vollmer, 1989, S. 148):

$$\begin{aligned} F_N &= F_N(t), \quad \max\{F_N(t)\} = 100N \\ F_T &= m \cdot a_{ab} = m \cdot a_{ab}(t) \\ F_F &= c \cdot s_{ab} = c \cdot s_{ab}(t) , \quad c = 1000N/m \\ F_S &= m \cdot g \end{aligned}$$

Also

$$\begin{aligned} F_{ab} \cdot v_{ab} &= (F_N + F_T + F_F + F_S) \cdot v_{ab} \\ &= (100 + m \cdot a_{ab} + 1000 \cdot s_{ab} + m \cdot 9.81) \cdot v_{ab} \\ &= 100 \cdot v_{ab} + m \cdot a_{ab} \cdot v_{ab} + 1000 \cdot s_{ab} \cdot v_{ab} + m \cdot 9.81 \cdot v_{ab} \\ &\leq 100 \cdot \max\{v_{ab}\} + m \cdot \max\{a_{ab} \cdot v_{ab}\} + 1000 \cdot \max\{s_{ab} \cdot v_{ab}\} + m \cdot 9.81 \cdot \max\{v_{ab}\} \\ &\quad \text{(Kräfte in N)} \end{aligned}$$

An diesem einfachen Modell sieht man bereits sehr klar, welchen Einfluss Schnittkraft, Messergeschwindigkeit und Messerbeschleunigung haben und welchen Nutzen die Kennwerte besitzen, die das Kurvenscheibenberechnungstool liefert. Die Masse von Hebel und Messer am Abtrieb liegt etwa bei 0.5kg, der Abtriebsweg bei 0..0.02m und die Kennwerte bei

$$C_v = \max\{v_{ab}\} = 0.317[m/s], \quad C_{MDyn} = \max\{v_{ab} \cdot a_{ab}\} = 1.59[m^2/s^3] .$$

Man sieht, dass wegen der geringen bewegten Massen und der geringen Federauslenkung die Nutzkraft überwiegt:

$$\begin{aligned} &100 \cdot 0.317 + 0.5 \cdot 1.59 + 1000 \cdot 0.01 \cdot 0.317 + 0.5 \cdot 9.81 \cdot 0.317 \\ &= 31.7 + 0.795 + 3.17 + 1.55 \approx 37.2 \end{aligned}$$

Also

$$M_{an} \approx \frac{37.2}{\omega_{an}} \left[\frac{Nm/s}{1/s} \right] = \frac{37.2}{2\pi} [Nm] = 5.9Nm$$

Diese überschlägige Rechnung hat zwei Funktionen. Zum einen hat der Verfasser mittels der Rechnung erkannt, dass in der ursprünglichen Simulation von Student A etwas nicht stimmen konnte (etwa 3Nm vs. 6Nm). Durch das frühere Einsetzen der Kraft war das den Ausdruck

quantitativ dominierende Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit deutlich niedriger, denn die maximale Geschwindigkeit wird erst in der Mitte des Hubs erreicht. Hier zeigt sich auch die gute Erklärungskraft der einfachen Modellierung. Zum anderen zeigt die Rechnung die wesentlichen für das Optimieren und zielgerichtete Variieren wesentlichen Einflussgrößen. Die Kurvenscheibengeometrie (Wahl des Grundkreises) und die Hebelgeometrie gehen hier nicht ein, was an der Nicht-Berücksichtigung der Verlustleistung liegt.

Abschließend gehen wir noch auf das grobe Abschätzungsmodell für das erforderliche Drehmoment ein, das Student B genutzt hat. Er hat aber selbst im Interview gesagt, dass die gemachten Annahmen über die Kräfte an der Kurvenscheibe nicht zulässig sind, und hat die Rechnungen nur gemacht, um zu sehen, wie sich bei Variationen die Werte ändern. Er betrachtet nur die statische Situation, bei der die Nutzkraft am Messer angreift und damit ein zu überwindendes Drehmoment an der Kurvenscheibe erzeugt. Die Kraft, die an der Kurvenscheibe angreift, wird einfach aus der Nutzkraft und dem Hebelverhältnis bestimmt; als Hebelarm beim erzeugten Drehmoment an der Kurvenscheibe wird der halbe größte Außendurchmesser der Kurvenscheibe verwendet. Die Ungenauigkeit dieser Annahmen zeigt das genauere Kräftemodell in Abbildung 17.

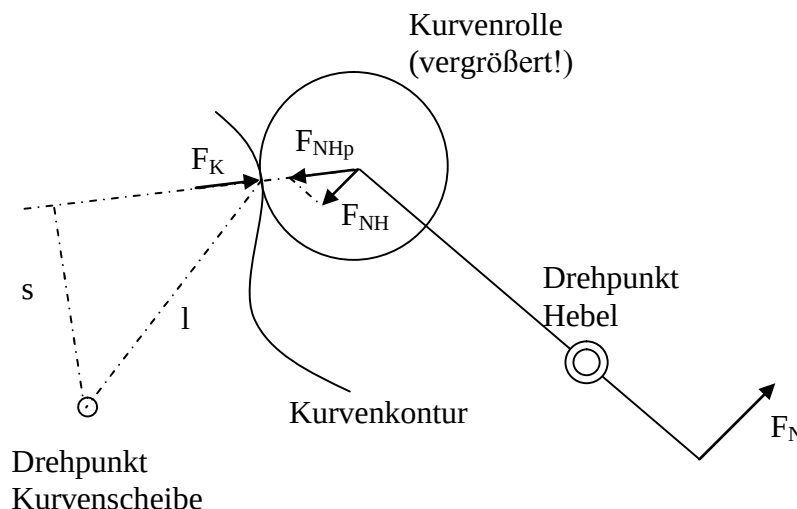


Abbildung 17: Kräftemodell

F_N ist die Nutzkraft am Abtrieb (hier also 100N). F_{NH} ist die Kraft, die daraus auf der anderen Hebelseite resultiert, und F_{NHP} die Projektion auf die Kurvennormale, da nur in Normalenrichtung eine Kraft übertragen werden kann. Damit es zur Drehung kommt, muss an der Kurvenscheibe in Normalenrichtung mehr als die entgegen gesetzte Kraft F_K wirken. Da diese in einem Hebelabstand s vom Drehpunkt der Kurvenscheibe wirkt, muss also das Drehmoment größer als $F_K \cdot s$ sein. Student B hat mit seinem Modell also an der Kurvenscheibe eine zu geringe Kraft angenommen, dafür aber mit dem größten halben Außendurchmesser einen deutlich zu großen Hebelarm verwendet, so dass er tendenziell zu große Werte bekommt. Andererseits hat er die dynamischen Massenkräfte und die Federkraft nicht berücksichtigt. Mit den erhaltenen Werten selbst konnte er nichts anfangen, da er keine Vorstellungen oder Erfahrungen mit Drehmomentgrößen bei konkreten Anwendungssituationen hatte. Das ist natürlich bedenklich.

Mit seinem Modell hat Student B einige Beispiele durchgerechnet, um „ein Gefühl“ für die Beeinflussung des Antriebsmoments durch Hebelverhältnis und Kurvenscheibe zu bekommen. Im Folgenden wird eine symbolische Analyse seines Modells präsentiert, die

demonstriert, dass man mit dieser Art der Modellierung effizienter arbeitet und bessere Resultate erzielt.

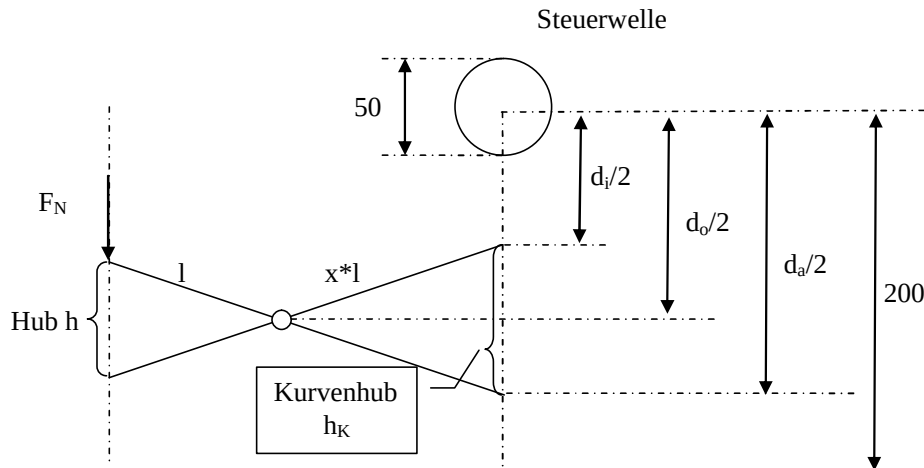


Abbildung 18: Abmaße (Angaben in mm)

Abbildung 18 zeigt alle im Modell vorkommenden Größen. Der Durchmesser der Kurvenrolle wird dabei wie bei Student B vernachlässigt, könnte aber leicht in das Modell eingebaut werden, was bei einem Durchmesser von 35mm auch durchaus angebracht wäre. Das Symbol x steht für das Hebelverhältnis, l ist die abtriebsseitige Hebellänge. Es gilt für das Hubverhältnis $h_K = x \cdot h$. d_i ist der kleinste Durchmesser der Kurvenscheibe (Rolle vernachlässigt!), d_a der größte und d_o derjenige bei mittlerem Hub. Es gilt offenbar:

$$\frac{d_a}{2} = \frac{d_o}{2} + \frac{h_K}{2} = \frac{d_o}{2} + \frac{x \cdot h}{2}$$

Nimmt man wie Student B als maximalen Hebelarm $\frac{d_a}{2}$ und gemäß dem Hebelverhältnis als

Kraft $\frac{F_N}{x}$, so erhält man als erforderliches Moment

$$M = \frac{F_N}{x} \cdot \frac{d_a}{2} = \frac{F_N}{x} \cdot \left(\frac{d_o}{2} + \frac{x \cdot h}{2} \right) = \frac{F_N}{x} \cdot \frac{d_o}{2} + \underbrace{\frac{F_N \cdot h}{2}}_{\text{konstant}} = f(x, d_o)$$

Um das Moment möglichst klein zu bekommen, sollte also d_o möglichst klein sein. Der minimale Wert ist

$$\frac{d_o}{2} = \frac{50}{2} + \frac{h_K}{2}, \text{ also } d_o = 50 + h_K = 50 + x \cdot h$$

Damit hängt das Moment nur noch vom Hebelverhältnis x ab, wobei Student B mit einem Messerhub von 25mm gerechnet hat (statt der notwendigen 20 mm):

$$M = \frac{F_N \cdot (50 + x \cdot h)}{2x} + \frac{F_N \cdot h}{2} = \frac{100 \cdot (50 + x \cdot 25)}{2x} + \underbrace{\frac{100 \cdot 25}{2}}_{1250} = \frac{2500}{x} + 2500 = M(x)$$

Es ist klar, dass $M(x)$ möglichst klein wird, wenn x so groß wie möglich gewählt wird. Aus Bauraumgründen gilt (siehe Abbildung 18):

$$h_{K \max} = 200 - 25 - 2 \cdot r_R \text{ mit } r_R = 17.5,$$

wobei der Radius r_R der Kurvenrolle hier auch berücksichtigt worden ist. Man erhält also

$$h_{K \max} = 140, \text{ also } x_{\max} = \frac{h_{K \max}}{h} = \frac{140}{25} = 5.6$$

Und damit alles minimales Moment $M_{\min}=2.95 \text{ Nm}$. Die obige Leistungsbilanzbetrachtung hat natürlich bereits gezeigt, dass dies zu gering angesetzt ist, aber es geht hier auch im Wesentlichen um den Vergleich mit den Beispielen von Student B und dem nicht ausgeschöpften Potential. Student B hat drei Beispielkonfigurationen numerisch durchgerechnet (die Ergebnisse ergeben sich auch sofort mit den oben hergeleiteten Formeln):

- $d_a=200, d_o=175, x=1$ ergibt $M=10 \text{ Nm}$
- $d_a=120, d_o=100, x=0.8$ ergibt $M=7.5 \text{ Nm}$
- $d_a=70, d_o=65, x=0.2$ ergibt $M=17.5 \text{ Nm}$.

Er hat sich dann für die mittlere Konfiguration entschieden, weil er vorher auch schon gesehen hatte, dass sich bei diesen Abmaßen eine „vernünftige“ (mit nicht zu steilen Anstiegen versehene) Kurvenscheibe ergab. Die obigen Formeln machen die Abhängigkeiten natürlich viel deutlicher. Auch zeigt sich das prinzipiell erreichbare Optimum von knapp 3 Nm , auch wenn dies zu einer extremen Kurvenscheibe mit zu schlechtem Übertragungswinkel führen würde. Man könnte aber anhand der entwickelten Formeln auch deutlich effizienter experimentieren.

3.3 Antworten auf die Untersuchungsfragen

In diesem Abschnitt sollen die im letzten Abschnitt dargelegten Ergebnisse noch einmal hinsichtlich der Untersuchungsfragen beleuchtet werden, um die notwendige mathematische Expertise bei der gegebenen Aufgabenstellung zu verdeutlichen.

- *Welche sichtbaren mathematischen Konzepte und Verfahren werden genutzt und welche Fähigkeiten benötigt man dabei? Unterscheidet sich die Nutzung von der Behandlung in der Mathematikausbildung?*

Am deutlichsten sichtbar ist das mathematische Konzept der „Funktion“, deren explizite Repräsentation und deren Konstruktion aus Einzelstücken. Das Kurvenscheibentool bietet zur Konstruktion die Angabe von Randpunkten für Abschnitte, ermöglicht die Angabe von Randbedingungen bzgl. der 1. und 2. Ableitung für diese Punkte, legt für gewisse Abschnitte (Rast in Rast, Gerade in Gerade) die Funktionen automatisch fest und offeriert für die nicht festgelegten Stücke gewisse Funktionsarten zum Übergang. Bei der Bewertung spielen Stetigkeit in den Ableitungen und Maxima bei den Ableitungen sowie beim Produkt der 1. und 2. Ableitung eine Rolle. Ferner werden die winkelabhängigen Funktionen auf Grundlage der eingegebenen Drehzahl in zeitabhängige Funktionen umgerechnet, was mathematische eine Verknüpfung von Funktionen bedeutet, ohne dass dies an der Oberfläche des Tools sichtbar würde. Die auswählbaren Funktionen treten nicht in ihrer symbolischen Repräsentation auf und die Anpassung an die Randbedingungen geschieht automatisch. Erfolgt eine Auswahl lediglich auf der Basis von Firmenrichtlinien, so ist keine weitere mathematische Kompetenz erforderlich. Ansonsten muss der Bearbeiter sich mit den Kennwerten als Gütekriterien zur Auswahl beschäftigen. Dies könnte zum einen dadurch geschehen, dass er sich mit der VDI-Richtlinie beschäftigt, dort seine Anwendungssituation (hohe Nutzlast oder dominierendes Trägheitsmoment) findet und dementsprechend auswählt. Ein tieferes Verständnis der Kennwerte ergibt sich aber erst bei der Beschäftigung mit dem Leistungsbilanzmodell, das im letzten Abschnitt dargestellt wurde. Wenn in einer Anwendungssituation die zur Verfügung gestellten „Einpassfunktionen“ nicht ausreichen, muss man sich natürlich tiefer liegend mit der Einpassung (eventuell mit Splinefunktionen) und den daraus resultierenden Bestimmungsgleichungen sowie mit der Beeinflussung der

Kennwerte durch Funktionsparameter beschäftigen. Dies ist in der diskutierten Anwendung im Tool bzw. in der Richtlinienarbeit verborgen.

Die Studenten hatten mit stückweise definierten Funktionen keine Probleme, da diese bereits in der Mathematik und in der Technischen Mechanik eine größere Rolle spielen. Dort wird mit symbolischen Darstellungen der Funktionsausdrücke für die einzelnen Abschnitte gearbeitet und es werden auch Stetigkeitsfragen (auch in den Ableitungen) diskutiert.

Mit verschiedensten Arten der Repräsentation von Funktionen werden die Bearbeiter im Mechanismen-Tool von Pro/Engineer konfrontiert. Funktionen können tabellarisch, über parametrisierte vorgegebene Funktionstypen und frei abschnittsweise symbolisch eingegeben werden. Wenn auch wie im vorliegenden Fall die tabellarische Eingabe die häufigste sein dürfte, so ermöglichen doch die Alternativen auch immer eine Probe, was Fehler oder Ungenauigkeiten der Eingabe anlangt. So könnte man beispielsweise eine mit einem symbolischen Tool (CAS, vgl. Alpers/Steeb 1998) erstellte stückweise definierte Funktion zur Kontrolle eingeben. Je umfangreicher das mathematische Repertoire des Bearbeiters ist, desto mehr Kontrollmöglichkeiten bieten sich.

Beim Funktionsoutput werden dem Benutzer tabellarischer und graphischer Output angeboten. Der graphische eignet sich natürlich gut zur Interpretation, während der tabellarische zur Weiterverarbeitung nutzbar ist. Die Interpretation besteht darin, dass man Eigenschaften des Graphs in Zusammenhang bringt mit mechanischen Vorgängen und dies ist natürlich ganz wesentlich, um die Sinnhaftigkeit und Korrektheit des Outputs bzw. der Programmnutzung zu prüfen, wie sich beim Drehmomentengraphen gezeigt hat.

Hat man tabellarischen Input oder Output, so stellt sich die Frage der Interpolation. Hier tauchen lineare und Splineinterpolation auf und der Benutzer sollte wissen, was auszuwählen ist. Neben dem reinen Erkunden der offensichtlichen Auswirkungen durch Ausprobieren („understanding through use“ nach Kent/Noss) wäre es sinnvoll, wenn er grundlegende Eigenschaften beider Interpolationsarten (nicht notwendig die konkrete Berechnung) kennen würde. So erhält man bei linearer Interpolation für eine Bewegungstabelle eine Fehlermeldung, wenn man sich Geschwindigkeit und Beschleunigung ausplotten lassen will, was mathematisch natürlich wegen der nicht gegebenen Differenzierbarkeit vollkommen korrekt ist. Bei der Splinedarstellung erkennt man bei der Kraftfunktion mit ihrem kurzen „Peak“ das Überspringen. Wie sich die Wahl auf die folgenden kinematischen und dynamischen Analysen auswirkt, lässt sich allerdings nicht sagen. Bei der hohen Punktdichte (180 bzw. 1000 Bilder) dürfte dies auch nicht von Belang sein.

Interpolation wird in der Mathematikausbildung behandelt, wobei sowohl lineare als auch Polynom- und Splineinterpolation thematisiert werden. Auch wenn die eigentlichen Berechnungen hier nicht mehr benötigt werden, so behandelt man doch gerade bei der Berechnung intensiv die gewünschten Eigenschaften, die bei der Anwendung wichtig sind, auch wenn deren Umsetzung in Gleichungen dem Benutzer abgenommen wird.

Funktionale Zusammenhänge treten in impliziter Form auch bei den geometrischen Analysen (Abstand, Winkel) von Student A zur Bestimmung der Kurvenscheibengeometrie auf. Hier geht es um die Variation einer (unabhängigen) Größe und die daraus resultierende Variation einer anderen (abhängigen) Größe. Als Resultat erhält man einen Graphen und eine Wertetabelle. Man muss sich aber bei den geometrischen Größen der Eigenheiten des Tools bewusst sein, um den Output sinnvoll nutzen zu können. Vorzeichenbehaftung oder Einschränkungen bei den Winkelmaßen müssen klar sein und ggf. zu einer Weiterbearbeitung der erhaltenen Werte verwendet werden. Um die Werte geometrisch sinnvoll nutzen zu können, muss man sie auch in einem (polaren oder kartesischen) Koordinatensystem verorten. In ähnlicher Weise entstehen Kurven in Parameterdarstellung mit Hilfe des Spurkurventools in Pro/Engineer. Hier werden auch nicht explizit Kurven über Funktionen $x(t)$, $y(t)$ bestimmt, sondern in „kinematischer Form“ festgelegt. Die Funktionsvorschrift ist sozusagen ein Mechanismus, der aus Eingabedaten eine Ausgabe erzeugt. In dieser Weise zustande

gekommene Funktionen werden in der Mathematikausbildung nicht behandelt. Sie scheinen den Maschinenbaustudenten wegen ihrer „Natürlichkeit“ und Anschaulichkeit aber keine Probleme zu bereiten. Man braucht aber ein gutes geometrisches Bezugsverständnis, um mit den gewonnenen Daten in der gegebenen Konfiguration richtig verortet weiterarbeiten zu können. So muss bei der Aufzeichnung der Spurkurve das „Papierteil“, das die Kurve aufnehmen soll, mitgedreht werden.

Auch bei den so erzeugten Funktionen oder Kurven in Parameterdarstellung spielt die Interpolation wieder eine – hier sogar noch wichtigere – Rolle. Es erfolgt hierbei kein expliziter „Interpolationsakt“ des Benutzers, so dass Interpolationsprobleme eventuell gar nicht bewusst werden (s.u. bei den Breakdown-Situationen).

Eine explizite algebraische Darstellung hat sich noch bei der Federeingabe ergeben. Dort ist eine Formel als Basis für die Bestimmung von Parametern angegeben. In dieser Formel sind die Parameter adäquat zu deuten, um eine sinnvolle Eingabe zu machen.

Vektoren tauchen explizit bei der Eingabe von Kräften auf. Hier muss man den Angriffspunkt spezifizieren, was in der Regel mit der Maus erfolgt, und man muss die Richtung vektoriell durch Koordinaten (in einem der zur Verfügung stehenden Koordinatensysteme) spezifizieren. Der Betrag wird wie bei den Bewegungen über eine Funktion eingegeben.

Geometrische Modellierung und Krätemodellierung zur Hebel- und Scheibenauslegung spielten bei Student B eine Rolle. Er hat aus der Geometrie mit Hilfe elementarer Trigonometrie und dem Satz des Pythagoras Gleichungen extrahiert. Ferner hat er in seinem „Kontrollansatz“ die Kurvenkontur über Kreisstücke zwischen geeigneten Ebenen und Splineinterpolation näherungsweise erstellt. Wichtig war hier die Verbindung von geometrischer und kinematischer Vorstellung, d.h. der Kreis entspricht einer Konstanz der Bewegung. Ferner muss, wenn die erzeugten Kurvenscheiben im „Assembly“ eingebaut werden soll, die richtige geometrische Zuordnung erfolgen.

- *Wie ist das Zusammenspiel von Intuition, Überschlagsrechnung und präziserer Modellierung, d.h. wo können Vorgehensschritte im von Kent und Noss benannten Spektrum vom qualitativen bis zum quantitativen Denken verortet werden?*

Beim Erstellen der Hebelgeometrie spielen Intuition (im Sinne von Erfahrung), qualitatives Denken und Überschlagsrechnung eine Rolle. Student A hat intuitiv einen Anfangsentwurf gemacht, während Student B zunächst eine Überschlagsrechnung durchführte. Bei letzterer kam auch das Denken in qualitativen Zusammenhängen zum Tragen, was das Verschieben des Hebeldrehpunktes und die Steilheit der Kurvenscheibe anlangt. Bei der Steilheit liegt intuitives Denken zugrunde, eine Explizierung des Zusammenhangs zwischen Steilheit und Übertragungswinkel erfolgt nicht. Beide Ansätze führen zu akzeptablen Lösungen; solange kein weiterer Optimierungsdruck besteht, ist eine genauere Modellierung nicht erforderlich. Beim Erstellen der Bewegungsfunktion erfolgt keine präzise Modellierung von Bewegungsgesetzen; auch diese ist erst nötig, wenn die angebotenen Bewegungsgesetze nicht ausreichen (etwa bei Schwingungsproblemen).

Bei der Konstruktion der Spurkurve hat Student B eine Überschlagsbetrachtung mit Kreissegmenten vorgenommen, die zur Fehlerentdeckung sehr sinnvoll war. Beim Erstellen mit dem Spurkurventool ist ein gutes kinematisches Verständnis der Kurvenentstehung (Synchronisierung von Mechanismus und Papierteildrehung) notwendig. Eine mathematische Modellierung erfolgt hier nicht.

Zur Überprüfung des Antriebsmoments hat sich das mathematische Leistungsmodell als ausgesprochen sinnvoll erwiesen, weil es zum einen Fehler erkennen lässt und zum anderen eine hohe Erklärungskraft bezüglich des Einflusses der einzelnen Kräfte besitzt. Damit kann man auch Eingabefehler erkennen, die nicht zu absurden Ergebnissen führen und damit sofort offensichtlich sind. Das formalisierte Krätemodell zu den Überlegungen von Student B

würde die Einflüsse ebenfalls deutlicher machen und Optimierungspotential offenbaren, wenn es auch insgesamt zu grob ist. Eine präzise Modellierung aller Kräfte ist nicht erforderlich. Bei der Federauslegung oder der Bewertung des Antriebsmoments kommt bei Student A Erfahrungswissen ins Spiel, ohne dass eine genauere Auslegung erfolgte. Wenn man keine größeren Anforderungen hat und im Wesentlichen nur einige Federn zur Verfügung stehen, ist dies nach Aussage des Anwendungskollegen durchaus üblich und akzeptabel. Eine genauere Modellierung erfolgt dann aus Zeitgründen nicht.

- *Gibt es verborgene, in Anwendungssituationen eingebettete Mathematik? Welches mathematische Verständnis ist notwendig, um mit den Anwendungssituationen sinnvoll umzugehen? Würde eine bewusste Mathematisierung generell auch im normalen Umgang zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung führen, etwa durch Reduktion des Herumprobierens?*

Die funktionalen Zusammenhänge sind alle mit Anwendungsbedeutung belegt und man benötigt auch diese Bedeutung zur adäquaten Interpretation. So geht es im Wesentlichen um Bewegungsfunktionen, also Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit und Beschleunigungs-Zeit-Funktionen und deren Zusammenhang über die Ableitungsbildung. Dieser Zusammenhang sollte zum Beispiel genutzt werden, um bei der groben Modellierung der Bewegungsfunktion (mit drei Nachkommastellen) zu erkennen, dass die angezeigte Beschleunigungsfunktion nicht die zu modellierende zweite Ableitung sein kann.

Eine mathematische Modellierung bei der Momentenberechnung (sei es Kraftmodellierung wie bei Student B oder Leistungsmodellierung) kann die Zusammenhänge und Bedeutungen der Einflussgrößen klarer machen und damit den Experimentieraufwand verringern. Dazu muss natürlich die Grobmodellierung und der Umgang mit algebraischen Ausdrücken ordentlich gekonnt sein, sodass eine gewisse Sicherheit und ein Zutrauen vorhanden ist. Die Modellierung macht auch Gedanken explizit und diskutierbar, öffnet sozusagen ein Fenster hin zu den Gedanken und Begründungen (Noss/Hoyles, 1996). Auch bei der Interpretation des Drehmomentengraphen ist die mechanische Anwendungsinterpretation entscheidend.

Die Analyse von Messgrößen (z.B. geometrisch: Abstände, Winkel) bei gewisser Variation ist im Grunde genommen auch eine Betrachtung funktionaler Zusammenhänge, auch wenn kein Funktionsausdruck vorliegt. Man erhält eine numerisch-tabellarische und eine graphische Darstellung.

Zur Bildung der Kurvenscheibenkontur ist aus der Spurkurve die Offsetkurve (in Pro/Engineer: „Kantenversatz“) zu bilden. Wenn man weiß, wie diese über Normalenvektoren zustande kommt, kann man sich die ungleichmäßige Verteilung der Schnittpunkte zwischen zu grob interpolierter Kurve und der mit Kreisstücken modellierten Kurve erklären.

- *Gibt es Richtlinien oder Konstruktionsregeln, die anstelle einer eigenen Berechnung schlicht angewendet werden?*

Die Wahl des Bewegungsgesetzes (modifizierte Sinuslinie) erfolgte nach der firmeninternen „Regel“. Damit entfiel eine genaue symbolische Betrachtung des Gesetzes, die resultierende Wertetabelle wurde als Input übernommen. Bei kritischerer Anwendung (d.h. eine genaue Einhaltung des Gesetzes ist notwendig) wäre auch eine symbolische Vorgehensweise sinnvoll, wobei man allerdings mit Hilfe der Richtlinie aus der normierten Funktion durch Strecken und Verschieben die Einpassung in den Bewegungsplan bestimmen muss.

- *Kommen tiefere Reflektionen und mathematisches Modellieren zum Einsatz, wenn Problemsituationen („Breakdown“) auftreten, etwa wenn Anforderungen nicht erfüllt sind, Richtlinien nicht einfach anwendbar sind, weitere Optimierung erforderlich ist*

oder ein Programm in der bisherigen Nutzungsart nicht das erforderliche durchführt? Gab es Probleme bei der Durchführung der Aufgabe, die auf fehlendes oder fehlerhaftes mathematisches Verständnis zurückzuführen sind? Welche Probleme resultieren aus der Unfähigkeit, eigentlich bekannte mathematische Modelle zu entdecken und vorhandenes mathematisches Wissen anzuwenden?

Es haben sich mehrere interessante Problemsituationen ergeben, die eine nähere Untersuchung erforderten:

- das Fehlen der Rast bei der mit dem Spurkurventool erzeugten Kurve: Nur eine Betrachtung des Zustandekommens der Kurve und ein Verständnis der Interpolation und der Offsetbildung liefern eine Erklärung und zeigen, wie man eine akzeptable Kurve erzeugen kann.
 - die stark oszillierende Beschleunigungs- bzw. Drehmomentfunktion: um hier ein Problem zu sehen, muss man natürlich bereits ein Verständnis vom eigentlich zu erwartenden Graphen haben, das auf Ableitungswissen basiert. Für die Erklärung sollte man die numerische Differentiation mit Hilfe von Differenzenquotienten kennen und aus den Werten schließen können, dass man wegen der Grobheit schwankende Geschwindigkeiten und damit Beschleunigungen erhält.
 - die Diskrepanz zwischen den Spitzenmomenten im Leistungsmodell und in der dynamischen Pro/Engineer-Analyse: auch diese fällt erst durch die Nutzung des Modells auf. Das Modell erklärt dann auch, wie die Diskrepanz wegen der geringeren Geschwindigkeit während des Wirkens der Kraft zustande kommt.
- *Welche kognitiven Modelle sind zur sinnvollen Nutzung der Programme erforderlich? Welche Objekte sind an der Benutzerschnittstelle sichtbar („boundary objects“) und welche mathematische Kompetenz ist für die Nutzung erforderlich oder zumindest hilfreich?*

Die mathematischen Objekte, die direkt an der Benutzerschnittstelle der beteiligten Programme (Kurvenscheibentool, Pro/Engineer) sichtbar sind, sind im Wesentlichen schon bei der Besprechung der explizit auftauchenden mathematischen Konzepte genannt worden: Funktionen und stückweise definierte Funktion im Kurvenscheibentool, Maxima, Produkte von Funktionen; Verknüpfung von Funktionen. Funktionsgraphen und Extrema; tabellarische und symbolische Repräsentation, parametrisierte Funktionen (Konstante, Rampe, Kosinus, Zykloide, parabolisch, Polynom).

Bei der tabellarischen Eingabe kann man die Art der Interpolation angeben (linear, Spline); man erhält den graphischen Output zum Überprüfen.

Bei der Federauslegung taucht der symbolischer Zusammenhang: $K=k \cdot (x-U)$, U unausgelenkte Länge, k : Federkonstante) auf, die Parameter sind einzugeben.

Bei den Kräften ist ein vektorieller Input mit Betragsfunktion und Richtungsvektor erforderlich.

- *Welche Rolle spielt mathematisches Verständnis bei der Interpretation des Programm-Outputs und der Überprüfung der Sinnhaftigkeit?*

Beim Kurvenscheibentool erhält der Benutzer Bewegungsdiagramme, Kennwerte und tabellarische Darstellungen als Output. Bei den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagrammen ist die entsprechende Größe über dem Winkel und nicht über der Zeit aufgetragen, um einen Vergleich mit der winkelbezogenen Wegfunktion zu ermöglichen. Es muss zur sinnvollen Interpretation natürlich noch klar sein, dass die Drehzahl als Faktor

eingeht. Bei der tabellarischen Bewegungsfunktion ist der Weg über der Zeit angegeben. Für gewisse Abschnitte fügt das Programm automatisch Stücke ein und der Benutzer sollte natürlich verstehen, wann solch ein Automatismus überhaupt möglich und daher zu erwarten ist.

Beim Spurkurventool erhält der Benutzer eine interpolierte Kurve, wobei die Anzahl der Bilder und damit der Interpolationspunkte wesentlich ist. Zum Verständnis ist wesentlich, dass die Spline-Interpolation „ausrundet“.

Die Analysen in Pro/Engineer liefern Funktionsgraphen als Output, die auch als Tabellen gespeichert werden können. Die Graphen müssen anwendungsmäßig auf ihren Sinn interpretiert werden, wobei auch verschiedene Graphen simultan zu betrachten sind. Nur dadurch können Fehler oder implizite Annahmen entdeckt werden.

Mittels der Analysen können als Output auch Animationen erzeugt werden. Hierbei ist darauf zu achten, ob die gewünschte Bewegung – im Rahmen der gewählten Auflösung – erkennbar ist oder ob Merkwürdigkeiten (wie z.B. ein „Fallen“ der Rolle auf die Kurvenscheibe) zu erkennen sind.

Bei der Darstellung von Geschwindigkeit und Beschleunigung bei tabellarisch gegebener Funktion mit Option „lineare Interpolation“ erhält man die Fehlermeldung: „Velocities and accelerations cannot be computed for linearly interpolated position table profiles“: Zum Verstehen muss man wissen, dass die genannten Größen die Ableitungen sind und die Funktion an den Knickstellen nicht differenzierbar ist.

Interpretation des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsoutputs erfordert graphisches Verständnis von Ableitung und auch ein Verständnis der möglichen Problematik bei Diskretisierung und näherungsweise Berechnung.

- *Welche Rolle spielt das zielorientierte Experimentieren mit Software bei der Lösung von Problemen und beim Erwerb eines Verständnisses für den Einfluß von Modellparametern („understanding through use“ bei Kent und Noss)?*

Experimente (d.h. grobe Beispielrechnungen) fanden eher vorher auf dem Papier statt, da das Umstellen der Konfiguration (etwa: Verlagern der Hebeldrehpunkte, Verlängern der Hebel) doch umfangreichere Konstruktionsanpassungen in Pro/Engineer erfordert hätte. Die Auswirkungen der Veränderung der Hebelgeometrie waren somit vorher erkundet und sind nicht erst durch Experimente in Pro/Engineer klar geworden.

Experimentieren könnte man etwa bei der Nutzung des Kurvenscheibentools, wenn man keine so eindeutigen Vorgaben hätte (was wohl in der Praxis eher der Fall ist). Man könnte mit den Hubphasenwinkel experimentieren und die Auswirkungen auf die Kennzahlen studieren, ebenfalls mit der Drehzahl. Dann sieht man etwa, dass die Hubzeiten und Drehzahlen linear in die Geschwindigkeit und quadratisch in die Beschleunigung eingehen, was man sich natürlich auch formelmäßig klar machen könnte.

Student A hat mit der Federkonstanten kurz experimentiert, aber die prinzipielle Wirkung war vorher klar.

- *Welches Wissen und welche Fähigkeiten sind vor und neben der Programmnutzung erforderlich (Materialkenntnisse, Normteile, Produktionsprozess, Kosten, ...)?*

Geringe Materialkenntnisse werden benötigt, da auch das Material für die dynamische Simulation bekannt sein muss. Ansonsten kämen erst bei der genaueren Auslegung Fragen nach Normteilen, Kosten, Montage, Wartung etc. auf. Kenntnisse über übliche Federkonstanten erleichtern die erste Wahl.

- *Gibt es generelle mathematische Kompetenzen im Sinne von Wake und Williams (1999) oder Grundvorstellungen und Grundverständnisse im Sinne von Bender (1991) und vom Hofe (1995), die notwendig oder hilfreich bei der Nutzung der Programme sind?*

Als wesentliche Grundvorstellung zieht sich durch die gesamte Arbeit an der Aufgabenstellung die Grundvorstellung von funktionalen Zusammenhängen und deren verschiedenen Repräsentationen (tabellarisch, graphisch, symbolisch, stückweise Angabe). Zur Untersuchung solcher Zusammenhänge und zum Erkennen von Fehlern ist ein Grundverständnis der Ableitung und der Differenzierbarkeit erforderlich. Dies zeigt auch Grenzen des Erreichbaren etwa beim Geschwindigkeitsmaximum, das nicht kleiner als die Sekantensteigung bei linearer Interpolation mit Knicken sein kann.

Bei der Betrachtung des Leistungsmodells ist ein Grundverständnis konstanter und variabler Größen und von der Komposition variabler Größen (etwa beim Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung) wichtig. Sowohl hier als auch beim Entwurf der Hebelgeometrie zeigen sich mehrere Einflussgrößen, die zusammen hängen, aber nicht gleich gerichtet wirken. Zur adäquaten Bearbeitung sollte ein Grundverständnis von komplexen Situationen mit solchen Einflussgrößen vorhanden sein und das Bewusstsein, dass eine schnelle Optimierung bei Beschränkung auf eine Variable nicht zum Ziel führt.

Mathematisch-mechanisch sollte eine Grundvorstellung von Kräften und ihrer Darstellung durch Vektoren, vom Kräftegleichgewicht sowie vom Leiten von Kräften durch eine Konfiguration (Kräftefluss) vorhanden sein.

Ebenso sollte mathematisch-mechanisch eine Grundvorstellung von der Erzeugung von Kurven durch bewegte Mechanismen vorhanden sein sowie eine Vorstellung von gleichabständigen Kurven (Offsetkurven).

- *Welche weiteren Berechnungsaufgaben würden an eine spezielle Berechnungsabteilung übergeben und wie sieht die Kommunikationsschnittstelle zu einer solchen Abteilung aus („boundary objects“)?*

Man könnte allenfalls eine Modellierung in Adams® oder einem anderen mächtigeren Festkörpersimulationsprogramm vornehmen, aber dabei treten auch nur die in der Mechanismen-Analyse verwendeten mathematischen Objekte (Inputfunktionen, Spurkurven) auf. Nur wenn man in Pro/Engineer auf Ergebnisse stößt, die nicht erklärbar wären, würde man wohl aus Skepsis lieber noch eine Überprüfung in solch einem System machen, falls es sich um eine kritische Anwendung handelt.

4. Resümee und Ausblick

In der in diesem Bericht beschriebenen Projektphase sollte die Mathematiknutzung bei einer „typischen“ Mechanismenaufgabe erkundet werden, die von zwei Studenten des achten Semesters bearbeitete wurde. Bezüglich der potentiellen Risiken des Untersuchungsansatzes, die in (Alpers, 2005) diskutiert werden, lässt sich Folgendes feststellen:

- Während Student A den betreuenden Anwendungskollegen häufiger konsultiert hat, hat Student B im Wesentlichen eigenständig gearbeitet und nur selten den Verfasser unterrichtet. So ist Student A weiter in der Aufgabe gekommen und konnte zielgerichteter arbeiten, aber auch Student B ist zu einem befriedigenden Ergebnis gelangt, wenn man auch manche Überlegungen (z.B. im zu groben Kräftemodell) hätte abkürzen können.

- Trotz geringer Einarbeitungszeit konnten die Studenten, insbesondere Student A, gut und effizient mit den Tools umgehen. Nach Aussage des Anwendungskollegen wäre es auch im industriellen Umfeld denkbar, dass Mitarbeiter ohne größere Schulung auf solch eine Aufgabe mit Pro/Engineer angesetzt würden. Bei einer strategischen Planung, die eine längerfristige Bearbeitung derartiger Aufgaben umfasst, wäre eher ein intensiverer Umgang mit dem Tool durch spezielle, geschulte Mitarbeiter sinnvoll.
- Beim Vorgehen der Studenten konnte – bis auf die zu grobe Modellierung des Studenten B – kein prinzipieller Unterschied zu industriellem Vorgehen vom Anwendungskollegen festgestellt werden, da man in der Praxis meist auch je nach vorhandener Zeit mit funktionierenden, sub-optimalen Lösungen zufrieden ist.
- Was die Repräsentativität der Aufgabe anlangt, so handelt es sich ja um einen Teilmechanismus aus einer existierenden Maschine. Der Mechanismus ist eher einfach und damit durchaus repräsentativ für die Art von Mechanismen, die die FH-Absolventen als Nicht-Spezialisten auch noch entwickeln könnten (ohne kompliziertere weitergehende Tools wie Mehrkörpersimulationssysteme zu nutzen).

Die Untersuchungsmethode hat sich als sinnvoll erwiesen, da es dem Verfasser durch intensiveres Nachfragen und Eigenbeschäftigung mit den Tools und den Ergebnissen der Studenten möglich war, Problemsituationen zu erkennen und das für ein Finden und Überwinden von fehlerhaften Situationen erforderliche mathematische Denken näher zu ergründen. Dies wäre bei einer Beobachtung von Arbeiten im realen industriellen Umfeld kaum denkbar, da man das Zeitkontingent der Mitarbeiter nur in sehr bescheidenem Rahmen beanspruchen kann. Natürlich war bei dieser Aufgabe ein tieferes Verständnis seitens des Verfassers auch dadurch möglich, dass er sich mit der Analyse von Mechanismen schon vorher beschäftigt hat.

Die Untersuchung hat die folgenden wesentlichen Erkenntnisse bezüglich der Mathematiknutzung und der erforderlichen mathematischen Qualifikationen ergeben:

- Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung und Nutzung der Tools hat sich das funktionale Verständnis als sehr wichtig herausgestellt. Dabei sollten verschiedene Repräsentationen (tabellarisch, graphisch, symbolisch) sowie ihre Beziehungen bekannt sein. Ferner können Funktionen auch in Analysen implizit über Bewegungen erzeugt werden. Zudem sollten auch die Beziehungen zwischen den graphischen Darstellungen von Funktionen und ihren Ableitungen bewusst sein, um die Richtigkeit der Eingaben zu kontrollieren.
- Bei der Bearbeitung wurden seitens der Tools bereits Funktionsbausteine zur Verfügung gestellt und auch die Zusammensetzung erfolgte automatisch. Sollten bei einer anderen Aufgabenstellung die vorhandenen „Bausteine“ nicht ausreichen, müsste der Bearbeiter sich natürlich genauer mit der symbolischen Darstellung von Funktionen auf Teilintervallen und mit Stetigkeits- und Differenzierbarkeitsfragen an den Zusammensetzstellen beschäftigen. Der Regelfall bei den FH-Absolventen dürfte aber eher wie in der aktuellen Aufgabenstellung die Nutzung von in Richtlinien empfohlenen und in Tools angebotenen Funktionsbausteinen sein.
- Bei den Lösungen durch die beiden Studenten sind recht zügig „funktionierende“ Entwürfe zustande gekommen. Solch ein schnelles Erstellen von tauglichen Objekten ohne weitere Optimierung ist nach Aussage des Anwendungskollegen in der Praxis durchaus üblich, wenn die Zeitkomponente die wesentliche Rolle spielt. Daher kommt es häufig nicht zu einer Optimierungsmodellierung.
- Es hat sich gezeigt, dass es bei den Programmen leicht zu fehlerhaften oder untauglichen Eingaben oder Nutzungen kommen kann. Dies hat sich bei der zu groben Interpolation der Kurvenscheibe oder bei der Eingabe der Bewegungsfunktion für das Messer ergeben. Um in einer solchen Situation die Fehlerhaftigkeit oder

Ungenauigkeit überhaupt zu bemerken, bedarf es einiger Kontrollmöglichkeiten, die mathematisches Verständnis und ggf. die Arbeit mit mathematischen Modellen erfordern. Nur wenn man weiß, dass bei einer Kurvenscheibenrast ein Kreisausschnitt zu erwarten ist, erkennt man die Ungenauigkeit. Nur wenn man weiß, dass die Ableitung das Steigungsverhalten modelliert, erkennt man bei zu grober Vorgabe der Zeiten das fehlerhafte Oszillieren im Ableitungsgraphen. Und nur mit dem groben Leistungsmodell wurde überhaupt die problematische Annahme bei der Bildung der Messerkraftfunktion entdeckt. Je mehr Kontrollmöglichkeiten (Vergleichsmöglichkeiten) man hat, desto wahrscheinlicher findet man Fehler oder Ungenauigkeiten.

- Hat man eine problematische Situation („Breakdown“) erkannt, so ist wiederum ein Verständnis der genutzten mathematischen Konstruktion oder eines einfachen Überslagsmodells sehr wichtig, um die Ursachen zu ermitteln und damit das Problem zu lösen. Bei der problematischen Kurvenscheibenkontur handelt es sich um eine Interpolation auf der Basis einer sehr „dünnen“ Punktevorgabe.
- Das Verwenden von groben Modellen erwies sich auch als sehr nützlich, um wesentliche Einflussgrößen zu erkennen und zielgerichtet zu variieren. So zeigt das Leistungsmodell sehr gut die im aktuellen Anwendungsfall für das Antriebsmoment entscheidenden Größen und ebenso die Bedeutung der Kennwerte, die in der VDI-Richtlinie und im Kurvenscheibentool angegeben sind. Auch das (zu grobe) Kräftemodell zeigt, dass modellbasiertes Variieren deutlich effizienter sein kann. Die Modelle können dabei (in einfachen Fällen) selbst entwickelt sein oder anderweitig (etwa aus Lehrbüchern) zur Verfügung stehen. Beide Qualifikationen, das eigene Modellieren (in überschaubarem Rahmen) sowie das verständige Arbeiten in von anderen erstellten Modellen, sind gleichermaßen wichtig.

Aus den obigen Erkenntnissen ergeben sich unmittelbar Konsequenzen für die Lehre. Inhaltlich sollten das Verständnis von Funktionen und ihren Ableitungen in allen Repräsentationsformen eine wichtige Rolle einnehmen. Ebenso ist die Interpolation, vielleicht stellvertretend für andere Methoden, die auf einem „beschränkten“ Datensatz beruhen, als wesentliches Thema zu nennen. Maschinenbaustudenten sollten auch eine Vorstellung von der Erzeugung von Kurven durch Bewegungen und von der Kurvenbeschreibung haben. Ferner sollte das Aufstellen von und die Arbeit in kleineren Modellen mit konstanten und variablen Größen trainiert werden. Dies ist wichtiger als die Betrachtung „hochkomplexer“ Modellierungsmöglichkeiten, die eher von Ingenieuren untersucht werden, die im Grundlagenbereich oder in der Vorentwicklung arbeiten.

Bislang wurden im Projekt eine eher statische Konstruktionsaufgabe und eine Mechanismenaufgabe bearbeitet. Um das Bild abzurunden (ohne den falschen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben), sollen in den folgenden Projektphasen „typische“ Aufgaben aus dem Bereich der Auslegung von Maschinenelementen mit dem Programm MDesign® und aus dem Bereich der Messtechnik (mit Labview®) identifiziert und untersucht werden. Bei der Auslegung sind zum Beispiel Lager, Schrauben oder Schweißverbindungen gemäß einem bestimmten Lastfall zu berechnen, bei der Messtechnikaufgabe eine messtechnische Apparatur aufzustellen, die Messungen zu erfassen und die Ergebnisse darzustellen, zu verarbeiten und zu interpretieren.

5. Literatur

Für die grundlegende Literatur zum Thema „Mathematik am Arbeitsplatz“ sei auf (Alpers, 2005) verwiesen.

Alpers, B.: Zur mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren, Bericht zum LARS-Projekt, Aalen 2005

Alpers, B., Steeb, S.: Flexible Mechanical Engineering Guidelines – A Maple-based Tool for Cam Design, MapleTech Vol. 5 (1998), No. 2/3, pp. 40-48

Noss, R., Hoyles, C.: Windows on Mathematical Meaning: Learning cultures and computers, Dordrecht: Kluwer 1996

Vollmer, J. (Hrsg.): Kurvengetriebe, 2. stark bearbeitete Aufl., Heidelberg: Hüthig, 1989

VDI-Richtlinie 2143, Blatt 1: Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe – Theoretische Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1980

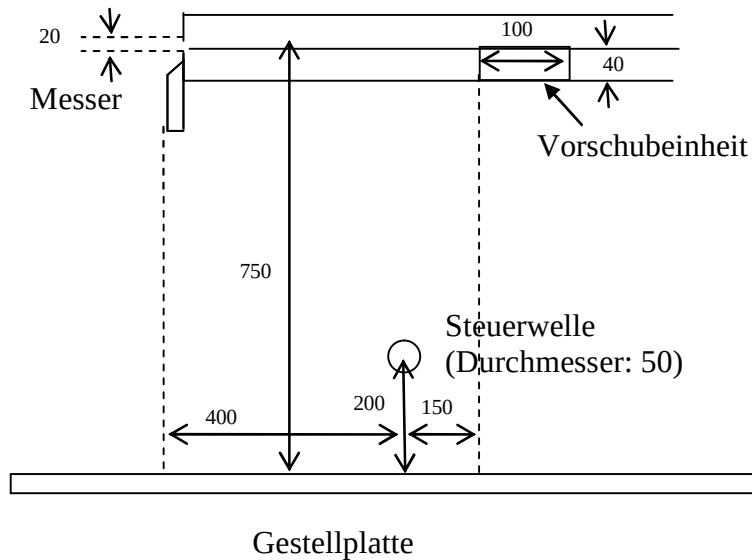
INNEO: Schulungsunterlagen zu Mechanismen in Pro/Engineer, o.J.

Anhang 1: Ausgegebene Aufgabenstellung

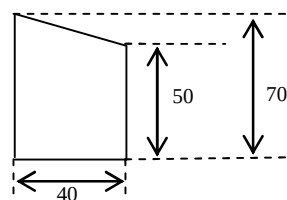
Aufgabenstellung: Transport- und Schneidemechanismus

Es ist ein kurvenscheibengesteuerter Mechanismus zu entwerfen, der ein Strangmaterial ein Stück vorschiebt und dann abschneidet. Dabei sind folgende Vorgaben zu beachten:

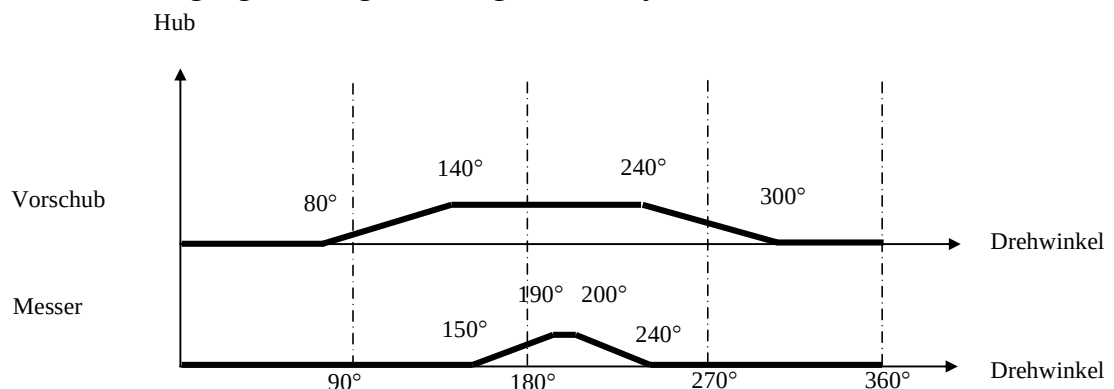
- Geometrische Vorgaben:



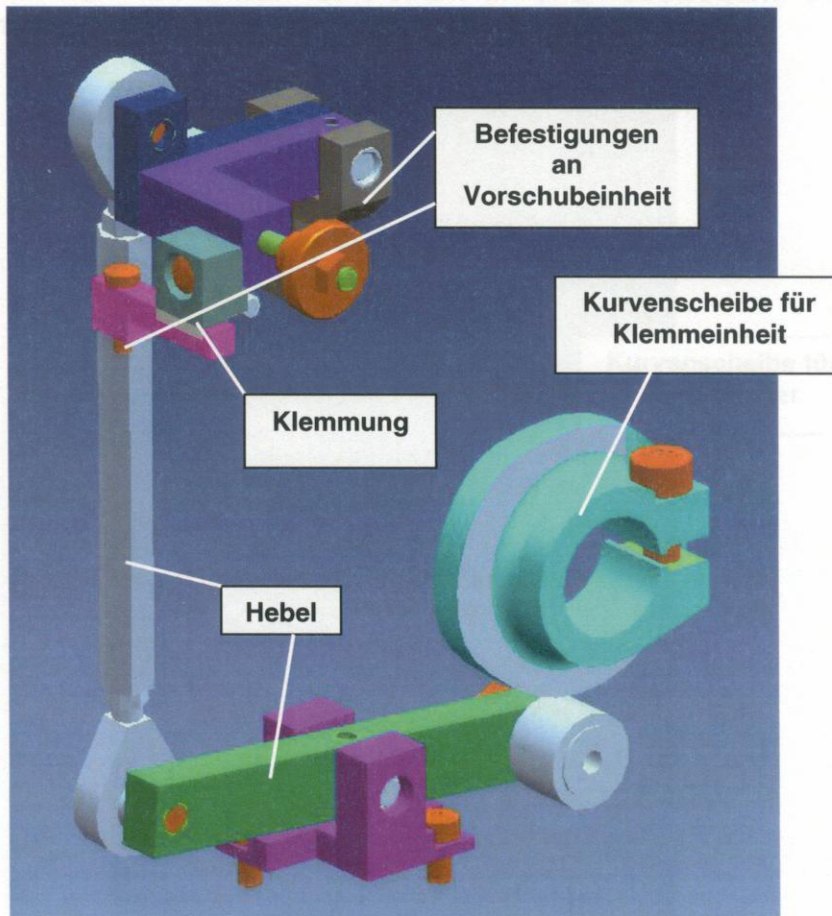
Vorderansicht des Messers:



- Messer und Vorschub sollen in einer Linearführung bewegbar sein.
- Die Bewegungen sind über Mechanismen zu realisieren, die durch auf der Steuerwelle befestigte Kurvenscheiben angetrieben werden. Für die Hub- bzw. die Vorschubbewegung sind folgende Vorgaben zur Synchronisation einzuhalten:



- Die Hübe sind geschwindigkeits- und beschleunigungsstetig mit einer modifizierten Sinusfunktion zu realisieren. Diese kann mit einem Tool aus einer Diplomarbeit berechnet werden.
- Der Vorschubhub soll 10mm betragen, der Messerhub ausreichend für den Schnitt.
- Es gibt noch eine weitere Einheit, die das Material während des Schnitts festhält. Diese ist in der Aufgabenstellung aber nicht zu bearbeiten.
- Das folgende Bild zeigt einen ähnlichen Hubmechanismus, der zur Anschauung dient.



- Es ist zu bestimmen, welches Drehmoment an der Steuerwelle erforderlich ist, um am Messer eine gewisse Schnittkraft zu realisieren. Gegebenenfalls ist die Konstruktion nach Rücksprache so zu ändern, dass das erforderliche Moment verringert wird.
- Als Tool steht neben dem o.a. Tool zur Funktionsberechnung Pro/Engineer Wildfire 2 mit den Modulen MDX-MDO zur Kinematik- und Kraftbestimmung zur Verfügung.

Informationen zur Durchführung der Aufgabe

Zeitraumen: ca. 100 Stunden

Arbeitsauftrag: wird vom Kollegen M. gestellt

Durchführung und Dokumentation des Arbeitsprozesses:

Falls sich Fragen bei der Bearbeitung (Randbedingungen, Detaillierungsgrad) ergeben, klären Sie diese bitte mit dem Kollegen M. Dokumentieren Sie bitte ihren Denk- und Arbeitsprozess so, dass er für einen Außenstehenden nachvollziehbar ist. Die Dokumentation sollte folgendes umfassen:

- Detailliertes Aufschreiben aller Überlegungen (Vorgehensweise, Identifikation von Teilaufgaben) und Entscheidungen, insbesondere auch der Probleme und Wege der Problemlösung (mit Alternativen, falls ebenfalls angedacht)
- Genaue Beschreibung der genutzten Ressourcen (Tools, Tabellenbücher, Formelsammlung, sonstige Bücher, Internet-Informationen, Produktbeschreibungen, ...) und der Art der Nutzung, auch Probleme mit der Nutzung
- Aufzeichnung der Problemklärungen mit dem Kollegen M.

Die Aufzeichnungen in der Dokumentation sollen nicht – wie in der Diplomarbeit oder bei den Mathematik III-Projekten – eine nachträglich wohlstrukturierte Form haben, sondern den eigentlichen Arbeitsprozess nachvollziehbar machen. Schreiben Sie also einfach nach jeder Arbeitsphase kurz und ohne Formulierungskunst auf, was Sie gemacht und dabei gedacht haben. Bewahren Sie bitte auch Ihre Notizzettel, Skizzen und Papierrechnungen auf und legen Sie diese zur Dokumentation.

Am Ende der Arbeit möchte ich nach Sichtung der Unterlagen noch einmal den Arbeitsprozess mit Ihnen durchgehen und Sie zu mir unklaren Punkten näher befragen, etwa auch zur genauen Nutzung der Tools wie CAD oder Mechanikprogramm.