

S. Beermann, H. Dinner

## **Getriebeauslegung mit modernem Systemansatz**

Der Getriebekonstrukteur steckt in einer Zwickmühle: Soll er den Bau eines Getriebes eher von der Festigkeits- oder der Konstruktionsseite her angehen?

Entweder beginnt er mit der Auslegung der zentralen Bauteile: Dazu werden die Zahnräder, Wellen und Achsen sowie die entsprechenden Lager und Verbindungen ausgelegt. Um die Berechnungen zu beschleunigen und Fehler zu vermeiden, wird dazu in der Regel ein Berechnungsprogramm für einzelne Maschinenbauelemente verwendet. Bereits hier findet sich der Ingenieur in einem iterativen Prozess: die meisten Berechnungsprogramme erlauben keine eine Berechnung des Gesamtsystems, sondern nur einzelner Elemente oder Paarungen. Sind diese Bauteile fertig ausgelegt und definiert, werden die Hauptabmessungen notiert und CAD Zeichnungen erstellt. Dabei stellt sich leider oft heraus, dass die Bauteile nicht in einen gegebenen Bauraum passen oder Kollisionen resultieren. Also zurück auf Start.

Die zweite Vorgehensweise: Er zeichnet sich Gehäuse, Wellen, Lager und Zahnräder die die geometrischen Randbedingungen erfüllen. Dazu kann er oft von einer bestehenden Konstruktion ausgehen und arbeitet nach Gefühl und Erfahrung. Nachdem die Zeichnung einen gewissen Grad der Reife erreicht hat, werden die wichtigsten Bauteile nachgerechnet und auf die geforderte Lebensdauer hin überprüft. Stellt sich dabei heraus, dass die Anforderungen an die Festigkeit nicht eingehalten werden, ist ein erheblicher Teil der schon geleisteten Arbeit hinfällig.

Beide Vorgehensweisen haben den Nachteil, dass eine Sichtweise das Arbeiten dominiert und die zweite vorerst nicht beachtet wird. Schleifen in der Auslegung, ein zeitaufwändiges und demotivierendes Wechseln zwischen Konstruieren und Berechnen ist die Folge. Es wäre effizienter und befriedigender, beide Sichtweisen gleichzeitig im Auge zu behalten. Dies war mit den bisherigen Software-Werkzeugen schwierig, bei kompakten und anspruchsvollen Konstruktionen praktisch unmöglich.

Mit KISSsys, dem Systemansatz zum Berechnungsprogramm KISSsoft, werden nun nicht mehr einzelne Maschinenelemente isoliert ausgelegt, sondern ein Gesamtsystem aus einzelnen Elementen aufgebaut und mit all seinen Verknüpfungen und den resultierenden Leistungsflüssen berechnet. Der Getriebebauer geht damit von der Betrachtung eines Maschinenelementes (z.B. Zahnradpaarung) über zur Betrachtung des Gesamtsystems (des kompletten Getriebes). Die primären Auslegungsfunktionen, wie sie in KISSsoft implementiert sind, werden dadurch deutlich mächtiger: Nach Änderungen an einem Element werden alle Auswirkungen auf die Lebensdauer anderer Teile des Systems angezeigt. Es können Lastkollektive auf globaler, d.h. Systemebene, definiert werden. Da ein Varianten-Konzept auf unterster Ebene in KISSsys eingebaut ist, können gleichzeitig verschiedene Konstruktions-Varianten (oder z.B. auch diverse Schaltstellungen eines Schaltgetriebes) in einem Modell gehalten und berechnet werden. Nachrechnungen und Konstruktionsänderungen sind dann jeweils für alle oder nur für die aktuelle Variante möglich. Das aufwändige Iterieren zwischen einzelnen Berechnungen bei der Auslegung des Getriebes entfällt damit, Wiederholungen der Berechnung für weitere Varianten

werden automatisch ausgeführt und Übertragungsfehler werden eliminiert. Dem Ingenieur bleibt mehr Zeit für seine eigentliche Arbeit, das Getriebe hinsichtlich Wirkungsgrad, Festigkeit, Kosten oder Lärmentwicklung zu optimieren

Darüber hinaus werden in KISSsys die beiden Sichtweisen – Konstruktion und Berechnung – zusammengefasst: In derselben Benutzeroberfläche, von der aus die Berechnungen verwaltet werden, ist eine dreidimensionale Darstellung der Bauteile in einem Gehäuse verfügbar. Jeder Auslegungs- und Optimierungsschritt kann damit sofort auf seine geometrische Realisierbarkeit hin überprüft werden.

Das Gehäuse des Getriebes wird aus Quadern und Zylindern/Hohlzylindern aufgebaut, die mit beliebigen Dimensionen frei im Raum platziert werden können. Die Kollisionsprüfung zwischen Gehäuse und den einzelnen Zahnrädern kann visuell im 3D Viewer erfolgen, hier sind die vordefinierten Ansichten (Grund-, Seiten- und Aufriss) sehr hilfreich. Interaktives Drehen, Verschieben und Zoomen mit der Maus, sowie die bauteilspezifische Farbgebung erlauben zudem eine gezielte Betrachtung des Modells. In Zweifelsfällen kann die Kollisionsüberprüfung programmiert werden. Dazu sind die Angaben über Wellenposition, Achsabstände, Kopfkreisdurchmesser und Gehäuseinnenabmessung zu verknüpfen. Dem User steht hierfür ein frei programmierbares Interface zur Verfügung, in dem Funktionen ähnliche wie in einem Tabellenkalkulationsprogramm definiert werden können. Solche Funktionen werden zur Identifikation farblich unterlegt und geben dem Konstrukteur bei Änderungen der Geometrie der Zahnräder oder des Gehäuses sofort über Kollisionen Auskunft.

Standardisierte Schnittstellen (wie dxf, step und iges) erlauben einen Austausch der in KISSsys definierten Geometrien der Wellen und Zahnrädern mit den gängigen CAD Programmen und erleichtern dem Konstrukteur die Erstellung der Zeichnungen. Ebenso können die Fertigungsparameter für die definierten Zahnräder direkt ausgelesen und in CAD Zeichnungen eingefügt werden.

Ein Beispiel soll die beiden wesentlichen Vorteile dieses modernen Konstruktions-Konzeptes verdeutlichen: Es ist ein dreistufiges Stirnradgetriebe mit vorgegebenem Bauraum zu entwickeln. Es kann von einer vorhandenen Konstruktion ausgegangen werden, wobei der Wirkungsgrad verbessert werden soll.

In Bild 1 ist die Ausgangssituation dargestellt. In KISSsys wurde das Modell eines dreistufigen Getriebes mit den Daten der bereits vorhandenen Konstruktion aufgebaut. Die Position der An- und Abtriebswelle sind vorgegeben, die beiden Zwischenwellen werden von KISSsys automatisch so platziert, dass die Achsabstände eingehalten werden. Das Antriebsmoment ist bekannt, das Abtriebsmoment wird unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades bestimmt. Es handelt sich um einen kleinen Stellantrieb mit spritzgegossenen Kunststoffzahnradern. Die Stahlwellen sind aus Kostengründen in Gleitlagern gelagert.

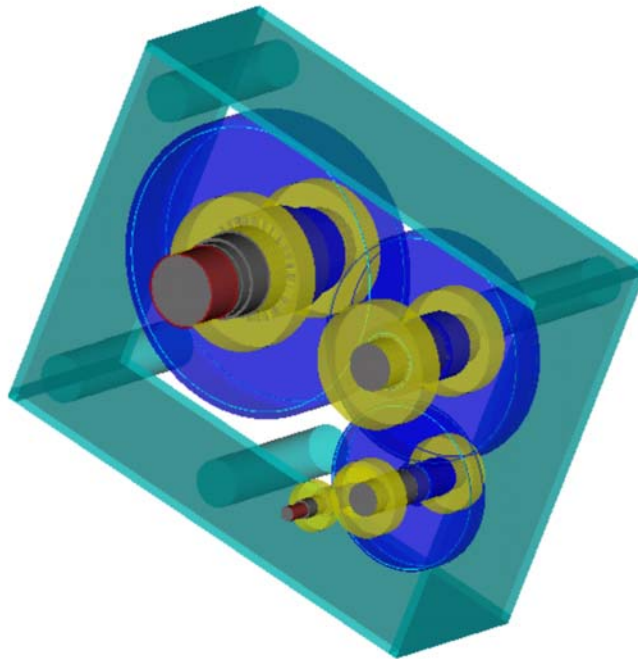


Bild 1: Aufbau des Getriebes inklusive Gehäuse

Die Funktionsweise des Getriebes, der Leistungsfluss, wird in KISSsys mittels einer Prinzipskizze schematisch dargestellt. Der aktuelle Leistungsfluss inklusive An- und Abtrieb ist hervorgehoben, die Antriebselemente und Lager werden schematisch dargestellt, siehe Bild 2. Wird ein Element der Prinzipskizze angeklickt, erscheint eine Quickinfo mit dem Elementnamen und das betreffende Element wird in der Baumstruktur hervorgehoben. Dies erleichtert die Suche nach bestimmten Elementen bei komplexeren Modellen erheblich, da die Prinzipskizze ein wesentlich intuitiveres Navigieren im Modell erlaubt. Gleichzeitig wird das selektierte Element auch in der 3D Darstellung mit einem elementbezogenen Koordinatensystem versehen und ist damit rasch lokalisiert.

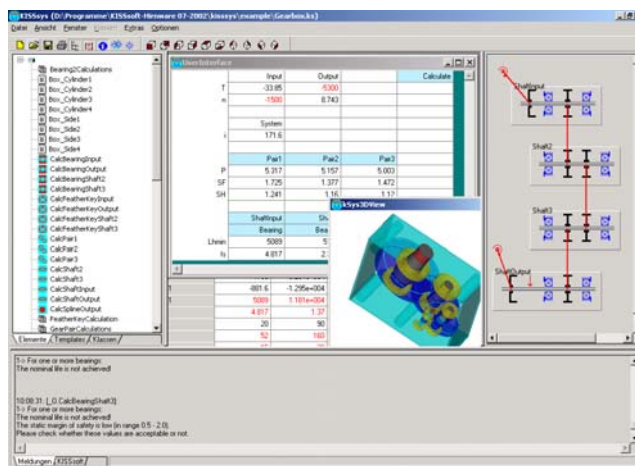


Bild 2: Baumstruktur, Eingabemasken und 3D Darstellung sowie Leistungsfluss in der Prinzipskizze

Für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades ist neben dem Wälzgleiten der Zahnflanken, Reibung in den Dichtungen und Planschwirkung bei Tauchschmierung die Reibung in den Wellenlagern massgebend. Der Reibungskoeffizient der vorliegenden Materialpaarung war nicht bekannt und wurde daher über eine Messung der Ein- und Ausgangsleistung an einem bestehenden, ähnlichen Getriebe mit derselben Materialpaarung bestimmt. Dazu wurde ein separates Modell dieses bestehenden Getriebes erstellt und der angenommene Reibungskoeffizient solange variiert, bis der errechnete Wirkungsgrad mit dem gemessenen übereinstimmte. Der so bestimmte Reibungskoeffizient von  $\mu=0.36$  der Materialpaarung wurde dann im Modell des zu untersuchenden Getriebes übernommen, siehe Bild 3.

	Input	Output		Kinematik	
speed	1250	1.315		KISSsoft	
torque	0.0135	-7.726	eta	0.98	
	i_ges	950.3	eta_ges	0.72	
			my	0.36	
	Pair1	Pair2	Pair3		
SF	8.875	1.322	1.763		
SH	0.7631	0.3739	0.4804		
	Shaft1	Shaft2	Shaft3		
w	0.0001908	0.001815	0.004302		

Bild 3: User Interface zur Eingabe der Parameter, Starten der Berechnung und Ausgabe der Resultate.

Die Leistungsverluste in den Gleitlagern bestimmen sich über den Reibungskoeffizienten und den Durchmesser im Lager. Je dünner die Welle im Lager ist, desto geringer ist das Moment infolge Reibung bei gegebener Lagerkraft. Während Wirkungsgrade von üblichen Gleitlagern sich nur wenig von denen von Wälzlagern unterscheiden (typischerweise  $\eta_{\text{gleit}}=0,97$  statt  $\eta_{\text{wälz}}=0,99$ ), liegt der Wirkungsgrad bei der vorliegenden, nicht optimierten Materialpaarung deutlich tiefer. Da die Materialwahl aus Kostengründen vorgegeben ist, muss der Reibverlust über den Durchmesser des Lagers reduziert werden. Ziel ist also eine möglichst dünne Welle, die den Festigkeitsanforderungen noch genügt. Die Überprüfung der statischen und der Ermüdungsfestigkeit der Welle erfolgt nach etablierten Rechenregeln. Dem Konstrukteur stehen die Verfahren nach Hänchen + Decker, nach der DIN 743 sowie nach der zweiten (1994) oder dritten (1998) Ausgabe der FKM Richtlinie 183 zur Auswahl.

In einem 2D Plot wurde der Gesamtwirkungsgrad des Getriebes und die Sicherheit der höchstbelasteten Achse gegen Ermüdungsbruch über den Lagerdurchmesser aufgetragen, Bild 4. Durch die Reduktion der Achsendurchmesser von ursprünglich 2.50 mm auf 1.25 mm konnte der Gesamtwirkungsgrad um rund 34% von 0.64 auf 0.86 gesteigert werden. Die Sicherheit der Welle wurde dabei von rund 2.40 auf den immer noch akzeptablen Wert von rund 1.95 reduziert.

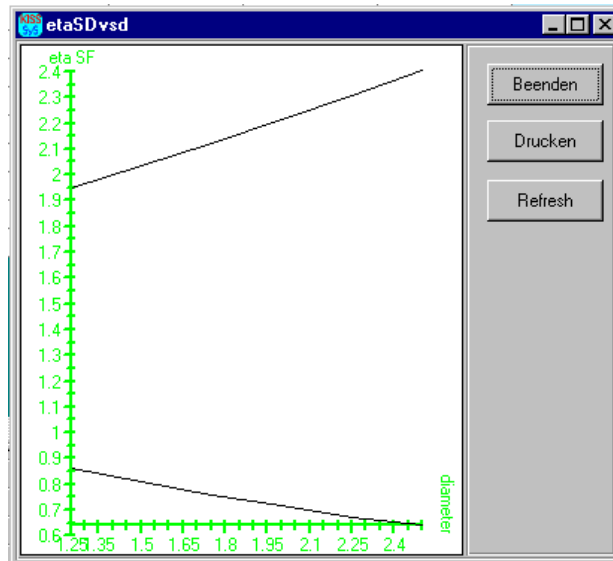


Bild 4: Sicherheitsfaktor der Abtriebswelle (obere Linie) und Gesamtwirkungsgrad (untere Linie) in Funktion der Wellendurchmesser.

Die Erstellung eines neuen KISSsys Modells wie oben illustriert wird von einem erfahrenen Benutzer mit Administratorenrechten vorgenommen. Normale Benutzer können ein bestehendes Modell übernehmen, Eingabedaten ändern, nachrechnen und Ergebnisse betrachten respektive übernehmen. Den logischen Aufbau des Modells, die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Elementen, können aber nicht verändert werden. Die Unterscheidung in Administratoren mit der Berechtigung Modelle zu erstellen und zu ändern und Benutzern, die Modelle verwenden dürfen, stellt dabei sicher, dass bestehende Modelle nicht durch unsachgemässen Gebrauch beschädigt werden können.

Der Aufbau von neuen Systemen erfordert einen grösseren Aufwand und ein tieferes Verständnis des Programms, während die Verwendung eines bestehenden Systems auch für den gelegentlichen Benutzer einfach ist. Damit wird KISSsys auch für den Vertrieb, den Aussendienstmitarbeiter oder gar für ausgewählte Endkunden zu einem hilfreichen Tool, da es Zugriff auf das Expertenwissen des Getriebebauers ermöglicht. Beispielsweise kann die bestehende Produktlinie komplett in KISSsys aufgebaut werden und steht dann in Form eines interaktiven Produktkataloges zur Verfügung. So lässt sich dann in einem Verkaufsgespräch die Frage z.B. nach der Lebensdauer der Wälzlager oder dem Wirkungsgrad bei einer erhöhten Eingangsleistung per Knopfdruck qualifiziert beantworten.

Mit dieser integralen Sicht der Konstruktion und Auslegung von Getrieben werden folgende Vorteile genutzt:

- Gleichzeitiger Fokus auf das Gesamtsystem als auch auf die beteiligten Einzelemente
- Zusammenarbeit zwischen Getriebeexperten, Konstrukteur und Vertrieb
- Austausch zwischen Berechnung und Zeichnung über normierte Schnittstellen
- Einfache und sichere Verwaltung konstruktiver, fertigungsspezifischer und festigkeitsrelevanter Daten
- Optimierung und Auslegung aller modellierten Maschinenelemente nach dem Stand der Technik basierend auf DIN, ISO und AGMA Normen

Die Arbeit des Getriebbauers wird mit dem Einsatz von KISSsys beschleunigt, vereinfacht, weniger fehleranfällig und damit letztlich interessanter und befriedigender.