

Bild 1
Benutzeroberfläche des Getriebe-variantengenerators

Optimierungsprozedur zum Auslegen von Stirnradgetrieben nach Gewicht, Kosten und Wirkungsgrad

Beim Entwurf von Getrieben – beispielsweise von einem Untersetzungsgetriebe mit parallelen Wellen und einer Gesamtuntersetzung von $i_{tot} 50 : 1$ – ist es für den Konstrukteur schwierig, in kurzer Zeit eine optimale Lösung zu finden, wenn die maximale externe Größe vorgegeben ist und gleichzeitig Herstellungskosten minimiert werden sollen. Zusätzlich müssen Gewicht, Gesamtverlustleistung sowie andere relevante Faktoren berücksichtigt werden. Ist es in einem solchen Fall besser, ein zweistufiges Untersetzungsgetriebe mit relativ hoher Untersetzung pro Stufe zu entwerfen – oder ein dreistufiges Getriebe?

Mit dem in der Folge vorgestellten Tool des „Getriebevariantengenerators“ werden automatisch zahlreiche Varianten von Getrieben erstellt. In einigen typischen technischen Anwendungen erzielt dieses Tool beste Ergebnisse: Das Potenzial für eine Gewichtsreduzierung ist höher als erwartet und erreicht bis zu 30 %, die Einsparungsmöglichkeit der Herstellungskosten ist sogar noch größer.

„Getriebevariantengenerator“

Die Basis zur Entwicklung dieses Tools ist „KISSsys“. Diese Software für die Berechnung von kompletten Antriebssträngen ist seit 2000 erhältlich. Sie kombiniert kinematische Analyse, Lebensdauerberechnung, 3D-Grafik und benutzerdefinierte Tabellen/Dialoge. Für speziellere

Probleme verfügt KISSsys über eine eingebaute Programmiersprache. Aufgrund seiner Flexibilität ist es das Tool erster Wahl für die Analyse der Festigkeit und Lebensdauer verschiedener Arten von Antriebssträngen und Getrieben.

KISSsys wird derzeit in verschiedensten Bereichen verwendet – wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, Windkraft, Landmaschinenbau, Elektrowerkzeugen, Industriegetrieben und vielen anderen. Die Software ermöglicht es dem Anwender, in kurzer Zeit schnelle und trotzdem detaillierte Parameterstudien eines kompletten Antriebsstranges zum Vergleich unterschiedlicher Varianten eines Konzepts vorzunehmen. Für die Lebensdauerberechnung der verschiedenen Maschinenelemente verwendet KISSsys die Maschinenelemente-Software „KISSsoft“. KISSsoft ist ein CAE-Tool für den effizienten und kos-

Autor

Dr. Ulrich Kissling
Geschäftsführer
KISSsoft AG

Kontakt
KISSsoft AG
Uetzikon 4
8634 Hombrechtikon/Schweiz
Tel.: +41 55 254 20 50
Fax: +41 55 254 20 51
E-Mail: info@KISSsoft.AG
www.KISSsoft.AG

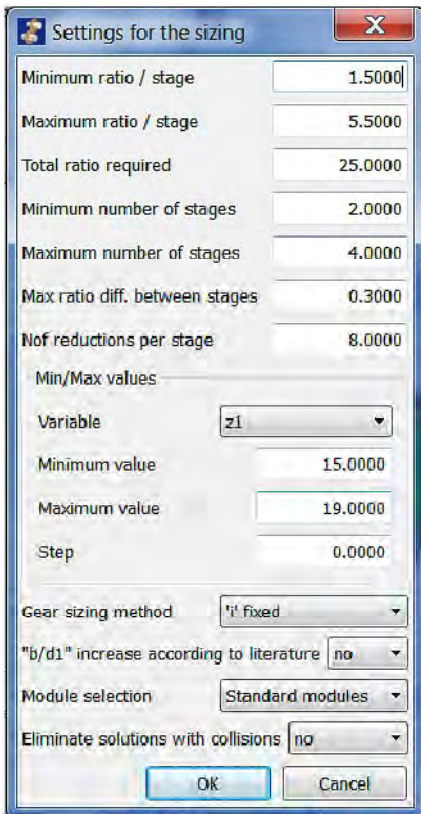


Bild 2

Einstellungsfenster für die Definition der Gesamtuntersetzung und anderer Parameter

tengünstigen Entwurf von Maschinenelementen wie zum Beispiel Zahnrädern, Wellen, Lagern, Schrauben, Welle-Nabe-Verbindungen und Federn.

Bild 1 zeigt den Getriebevariantengenerator. Folgende Komponenten sind integriert:

- (1) Resultate-Fenster: 3D-Diagramm zur Darstellung der wichtigsten Ergebnisse für die errechneten Getriebevarianten.
- (2) Auslegungsfenster: beinhaltet die verschiedenen Funktionen für die Auslegung.
- (3) Benutzeroberfläche: ermöglicht die Eingabe des geforderten Drehmoments und der Drehzahl.
- (4) Dialog „Einstellungen“: Eingabe allgemeiner Daten wie Schmierungsart und Wahl der Berechnungsmethoden.
- (5) Tabelle der Varianten: Liste der unterschiedlichen Untersetzungsgetriebe, von denen jedes einzeln angewählt werden kann.
- (6) 3D-Ansicht: Anzeige einer ausgewählten Variante.

Verfahren zur Auslegung von Getrieben

Die für die Getriebegestaltung vorgegebenen Daten sind hauptsächlich die erforderliche Gesamtuntersetzung sowie Drehmoment/Drehzahl am Eingang oder Ausgang. Weiterhin werden Parameter wie die erforderliche Lebensdauer und minimale Sicherheitsfaktoren für die Auslegung der Getriebe-komponenten benötigt. Die Anzahl der Stufen und die Verteilung der Gesamtunter-

setzung auf die einzelnen Stufen können hingen variieren.

Die manuelle Lösung solcher Probleme kann sehr zeitaufwändig sein, da verschiedene Varianten von Untersetzungsgetrieben sorgfältig untersucht werden müssen. Das neu entwickelte Tool kann unter Verwendung von Funktionen für die Auslegung von Zahnradstufen, Wellen und Lagern die automatische Gestaltung eines kompletten Getriebes durchführen. Auch das Gehäuse wird automatisch dimensioniert. Auf Basis der Preise (in € / kg) für die Herstellung von Zahnrädern, Wellen, Ritzelwellen und Gehäusen werden zusätzlich die Herstellkosten kalkuliert. Falls Lagerpreise verfügbar sind (der Anwender kann eine Liste mit Preisen für Lager vorgeben) werden auch die Wälzlager in die Berechnung der Kosten einbezogen. Der ISO TR 14179 dient als Grundlage der Bewertung der thermischen Gesamtleistung und der Bestimmung des Gesamtwirkungsgrades.

Erster Schritt: Vorschlag der Varianten für die Untersetzungsverteilung

Im ersten Schritt wird die Anzahl der Getriebestufen definiert. Wenn die Stufenzahl nicht durch den Anwender fixiert wird, werden Varianten mit einer unterschiedlichen Anzahl von Stufen geprüft.

Darüber hinaus kann die Verteilung der Untersetzungen i_{stage} über die einzelnen Stufen variieren und sollte daher an unterschiedlichen Varianten getestet werden. Es ist bekannt, dass meistens die wirtschaftlichsten Lösungen erreicht werden, wenn die Untersetzung der Eingangsstufe etwas höher als die der Abtriebsstufe ist. Dies sollte von der Software untersucht werden.

In diesem Zusammenhang kann eine in der Interpretersprache von KISSsys programmierte Funktion (ähnlich einem Makro in Excel) aufgerufen werden, welche eine Liste von Getrie-

bevarianten mit unterschiedlichen Stufen und Untersetzungen pro Stufe vorschlägt (Tabelle 1). Als Eingabe wird die erforderliche Gesamtuntersetzung des Getriebes und die minimale sowie maximale Untersetzung pro Stufe (Bild 2) benötigt. Außerdem kann die Anzahl der verschiedenen Untersetzungen (zwischen der minimalen und maximalen Untersetzung) definiert werden. Zunächst wird jede mögliche Untersetzungskombination berechnet. In diesem Beispiel (Bild 2) könnten 2- bis 7-stufige Getriebe verwendet werden, um eine Gesamtuntersetzung von 25 mit einem Minimum von 1,5 pro Stufe zu erreichen. 7 Stufen wären hier nicht sehr sinnvoll, demzufolge wurde die maximale Anzahl der Stufen auf 4 begrenzt. Sogar mit dieser Begrenzung würden insgesamt 204 Varianten resultieren, wenn man alle möglichen Untersetzungen kombiniert! Infolgedessen würde die Berechnungszeit für die Auslegung von 204 Getrieben beträchtlich sein. Ein Getriebe beispielsweise mit $i_1 = 2$, $i_2 = 1,5$, $i_3 = 1,5$, $i_4 = 5,5$ wäre jedoch keine realistische Lösung. Daher wurde ein Höchstwert für die zulässige Untersetzungsdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Stufen hinzugefügt. Der Anwender kann dieses Maximum festlegen – ein angemessener Wert ist hier folglich 30%. Mit dieser zusätzlichen Beschränkung wird die Anzahl der Varianten auf 15 reduziert (Tabelle 1).

Definition zusätzlicher Auslegungsparameter

Wenn der Anwender mit den vorgeschlagenen Stufen- und den Untersetzungsvarianten einverstanden ist, können zusätzliche Auslegungsparameter definiert werden. Für die Auslegungsfunktion der Zahnradsätze lässt sich ein Bereich für z_1 , b/d_1 , b/m_n , b/a und den Schrägungswinkel vorgeben. Zusätzlich kann über eine Schrittweite ein Gitter bestimmt werden. Falls die Schrittweite auf 0 gesetzt ist, muss die Lösung im Bereich

	A	B	C	D	E	F
1	Variant	Stages	iStage1	iStage2	iStage3	iStage4
2	Variant no: 1	2	5.473	4.568		
3	Variant no: 2	2	4.545	5.5		
4	Variant no: 3	3	3.648	2.618	2.618	
5	Variant no: 4	3	3.03	3.152	2.618	
6	Variant no: 5	3	3.03	2.618	3.152	
7	Variant no: 6	3	2.517	3.152	3.152	
8	Variant no: 7	4	2.928	2.174	2.174	1.806
9	Variant no: 8	4	2.432	2.618	2.174	1.806
10	Variant no: 9	4	2.928	2.174	1.806	2.174
11	Variant no: 10	4	2.432	2.174	2.174	2.174
12	Variant no: 11	4	2.02	2.618	2.174	2.174
13	Variant no: 12	4	2.02	2.174	2.618	2.174
14	Variant no: 13	4	2.432	1.806	2.174	2.618
15	Variant no: 14	4	2.02	2.174	2.174	2.618
16	Variant no: 15	4	1.678	2.174	2.618	2.618

Tabelle 1

Vorgeschlagene Stufenzahl und Untersetzungsverteilung auf Basis der Eingaben in Bild 2

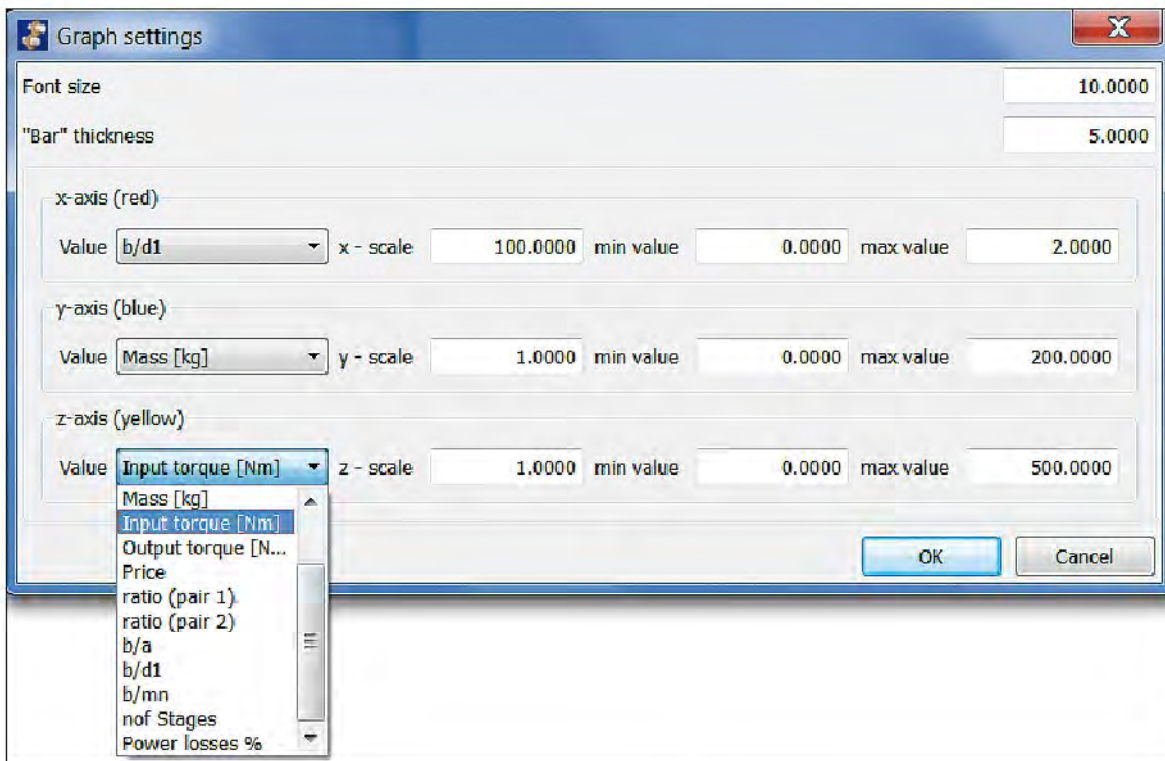
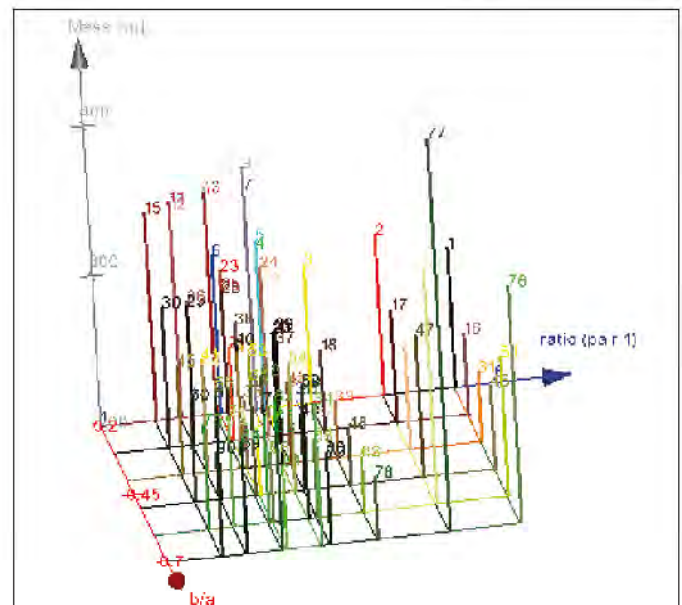
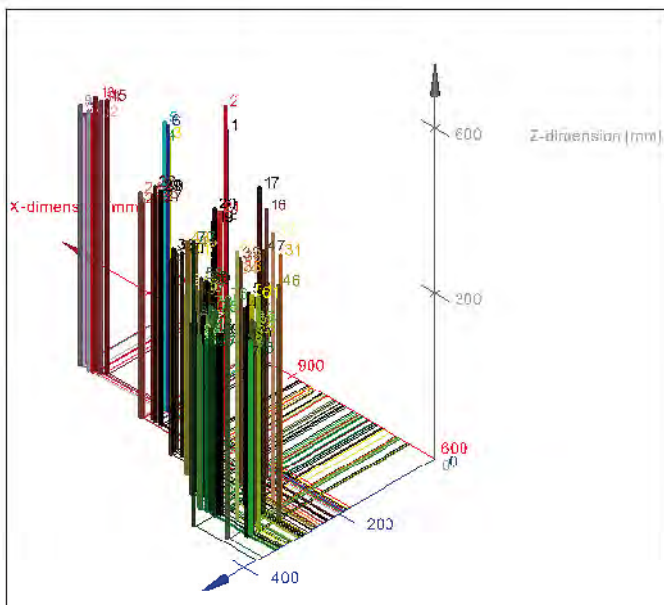


Bild 3

Darstellung der Kenn-
daten von 90 Unter-
setzungsgetriebevari-
anten (500 Nm und
1000 U/min am Ein-
gang)

Links unten: Gehäuse-
abmessungen in X-,Y-
und Z-Richtung

Rechts unten: Anzeige
des Getriebegewichts
(Z-Achse) in Abhän-
gigkeit vom Verhältnis
 z_2 / z_1 von Stufe 1
und dem Verhältnis
 b / a der Stufen (alle
Stufen eines bestimm-
ten Getriebes werden
mit dem gleichen b / a
dimensioniert)



min-max liegen. Wenn eine Schrittweite definiert wird, wird ein vollständiger Satz von Getrieben für jeden Gitterpunkt erzeugt (Beispiel mit b/d_1 : min = 0,6, max = 1,2, Schritt = 0,2 erstellt einen Satz von Getriebevarianten mit festem $b/d_1 = 0,6$, dann mit 0,8, 1,0 und 1,2). Sinnvolle Bereiche für diese Parameter findet man in der Fachliteratur, z. B. [1]. Einen erheblichen Einfluss auf Größe und Gewicht der Untersetzungsgetriebe haben das Verhältnis b/a (Zahnbreite zu Achsabstand) bzw. das Verhältnis b/d_1 (Zahnbreite zu Ritzeldurchmesser). Diese Parameter können zur Bestimmung einer Bandbreite (zwischen Mindest- und Höchstwert) verwendet werden. Die zusätzliche Option, eine Schrittweite in Kombination mit einem solchen Parameter zu definieren, bringt hier gute Ergebnisse.

Studien, die mit diesem Tool durchgeführt wurden, und welche die Abmessun-

gen von Untersetzungsgetrieben und deren Preis – mit und ohne Flankenlinienkorrektur – miteinander verglichen, lieferten hochinteressante Resultate.

Zweiter Schritt: Auslegung aller Getriebevarianten

Die automatische Optimierungsfunktion erzeugt im Anschluss an den Variantenvorschlag eine beliebige Anzahl unterschiedlicher Getriebe, ermittelt für jeden Wirkungsgrad, die Dimensionen und Kosten, und dies in Abhängigkeit vom erforderlichen Parameterbereich (b/a , b/d_1 , i_{stage}) und der Anzahl der Stufen. Die Berechnungszeit pro Getriebe auf einem durchschnittlichen Laptop beträgt einige Sekunden.

Die automatische Erstellung von vollständigen Getrieben wird durch zwei wichtige Funktionen vereinfacht:

1. Auslegungsfunktion für ein Zahnradpaar mit vordefinierten Konstruktionsparametern, Sollsicherheitsfaktoren und Berechnungsmethode.
2. Auslegungsfunktion für eine Welle (Länge, Durchmesser) einschließlich Auslegung der Lager (auf Basis der Solllebenszeit und dem vom Benutzer vordefinierten Lagertyp).

Diese Funktionen dienen der automatischen Erstellung ausgewogener, gut dimensionierter und anforderungsgerechter Lösungen, die ohne signifikante Änderungen bei der detaillierten Konstruktion verwendet werden können [2]. Die Auslegungsfunktionen sind so ausgewogen, dass alle erzeugten Zahnradsätze genau das Soll Drehmoment übertragen können; der Servicefaktor aller Varianten ist daher genau der gleiche. Dadurch können das Gewicht, die Preise und alle weiteren Ergebnisse direkt

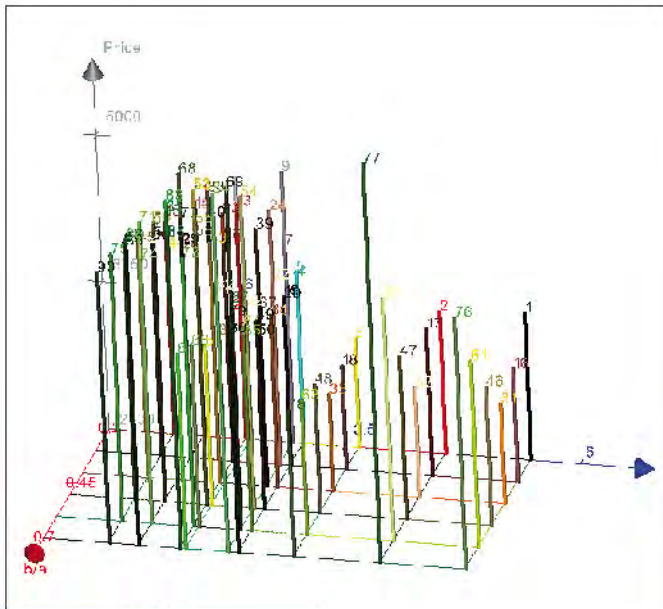
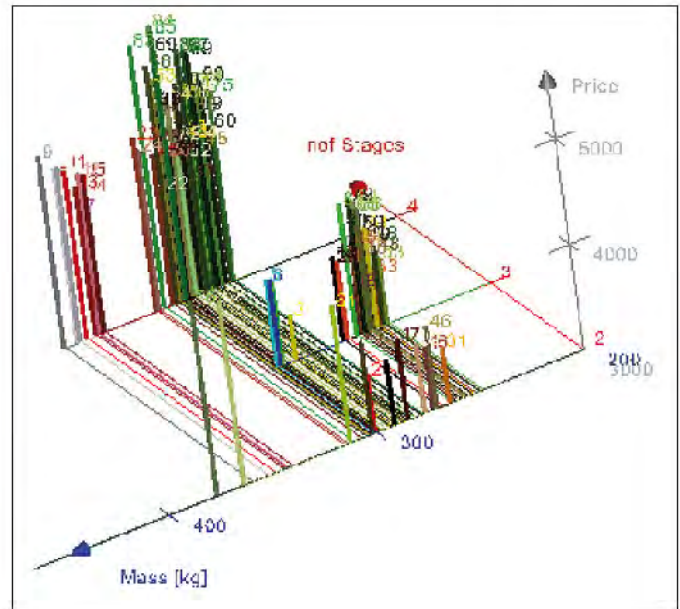


Bild 4

Anzeige der Herstellungspreise für Getriebe (Z-Achse)

Links: X-Achse: Verhältnis z_2 / z_1 von Stufe 1; Y-Achse: Verhältnis b / a . Der Bereich der niedrigsten Preise liegt auf der Linie $b / a = 0,4$

Rechts: X-Achse: Stufen (2 bis 4); Y-Achse: Gewicht (kg). Geringstes Gewicht und niedrigste Preise auf der 3-Stufen-Linie



verglichen werden. Die wichtigsten Daten jeder Getriebevariante werden in CSV-Dateien geschrieben, die direkt in Excel geöffnet werden können.

Die eine Ergebnisdatei enthält Geometriedaten (wie Zahnzahlen, Zahnbreite ...) und Sicherheitsfaktoren (Zahnfuß, Grübchen); die andere Datei enthält Preisinformationen. Das Programm bestimmt automatisch, ob ein Zahnrad auf einer Welle montiert wird oder eine Ritzelwelle ist. Es prüft auch, ob mögliche Kollisionen zwischen Lagern oder Zahnradern mit der Welle der nächsten Stufe bestehen. Der Anwender kann hierbei bestimmen, ob Varianten mit Kollisionen entfernt werden sollen oder nicht. Werden kleinere Kollisionen toleriert, sind solche Varianten in der Ergebnisdatei mit „auf Kollision überprüfen“ markiert.

Dritter Schritt: Analyse der Resultate

Es werden viele Parameter in den Ergebnisdateien angezeigt. Das Resultatfenster ist sehr hilfreich, um einen Überblick zu erhalten, da hier die Ergebnisse in 3D-Diagrammen dargestellt werden.

Die in Bild 3 dargestellten Zahlen über den angezeigten Balken geben die Nummern der Getriebevariante an, wie sie in den Excel-

Sheets dokumentiert sind. Was auf den drei Achsen dargestellt werden soll, kann vom Anwender ausgewählt werden, um die interessierenden Kenndaten anzuzeigen, wie zum Beispiel die Gehäusegröße. Es ist erstaunlich, wie groß der Unterschied des Gehäuses in X- und Y-Richtung sein kann.

Eine weitere interessante Anzeige ist das Getriebegewicht (Bild 3), von der leichtesten Variante (237 kg) bis zur schwersten (356 kg), wobei die Differenz mehr als 50 % beträgt. Aus ökonomischen Gründen ist die Anzeige der Herstellkosten bedeutsam. Hier ist der Unterschied zwischen den niedrigsten (3360 Euro) und den höchsten Kosten (5906 Euro) sehr groß (Bild 4)! Je nachdem, welche der verschiedenen Getriebeeigenschaften für das aktuelle Design wichtig sind, kann die Anzeige angepasst werden, damit die beste Lösung – für den erforderlichen Zweck – deutlich sichtbar wird.

Während der Auslegung werden alle Daten der unterschiedlichen Varianten gespeichert. Wenn der Konstrukteur eine der Varianten im Detail untersuchen möchte, kann er dies mit der Funktion „Einzelne Variante auswählen“ tun. Die Variante wird dann geladen, berechnet und im 3D-Fenster angezeigt.

Die hier gezeigten Resultate gelten für Untersetzungsgetriebe mit Zahnradern der Qualität 6 und Flankenlinien mit Breitenballigkeit. Wird eine andere Herstellungsmethode ausgewählt oder die Gesamtuntersetzung verändert, können sich die Resultate deutlich ändern.

Fazit

Viele Softwareprogramme sind für die Auslegung von Maschinenelementen von Einzelelementen bis zu kompletten Getrieben erhältlich. In den meisten Programmen erzeugen die Auslegungsfunktionen jedoch

nur eine Lösung für ein bestimmtes Problem. Der Benutzer muss sich darauf verlassen, dass dies auch die beste Lösung ist. Der Ingenieur möchte natürlich den besten Vorschlag erhalten, er sollte aber auch alle fast so guten Vorschläge sehen können und danach eine Variante auswählen, die seinen individuellen Anforderungen am besten entspricht.

Ein neues Tool – der Getriebevariantengenerator – ermöglicht die automatische Erstellung einer beliebigen Anzahl von Getriebevarianten. Dabei werden Funktionen zur Auslegung der Getriebestufen, Wellendurchmesser, Lager und Gehäuse verwendet. Vorgegeben werden die erforderliche Drehmomentkapazität, Solllebensdauer, Soll-Sicherheitsfaktoren und das Gesamtuntersetzungsverhältnis. Nach Vorgabe des Anwenders werden Getriebevarianten mit unterschiedlicher Stufenzahl und verschiedener Untersetzungsverteilung über die Stufen erzeugt. Die Resultate wie Gewicht, Verlustleistung, Herstellkosten und Drehmomentkapazität können in 3D-Diagrammen dargestellt werden, in denen die nummerierten Varianten angezeigt werden. Dadurch kann der Anwender die vom Getriebevariantengenerator ermittelten Vorschläge überprüfen sowie die nicht ganz optimalen Auslegungen zum Vergleich heranziehen und dann die für seine Zwecke am besten geeignete Lösung auswählen.

Die KISSsoft AG stellt Maschinenbau-Berechnungsprogramme für die Nachrechnung, Optimierung und Auslegung von Maschinenelementen (Wellen, Lagern, Zahnradern und anderen) her. Die Anwendung erstreckt sich vom einfachen Maschinenelement bis zur automatischen Auslegung kompletter Getriebe. Die kostenlose Testversion vom aktuellen Release ist verfügbar unter www.KISSsoft.AG

Literatur

- [1] Niemann, G.; Winter, H.: Maschinenelemente, Band II, Springer Verlag, 1985, ISBN 3-540-11149-2.
- [2] Kistling, U.: Ein Werkzeug zur Konzeption von Antrieben am Fallbeispiel der Entwicklung einer Getriebe-Baureihe, SimPEP Kongress 2009, Würzburg.