

Konstruktion und Berechnung von Getrieben mit FVA-Programmen – dargestellt am Beispiel des virtuellen FVA-Getriebes



H. Winter, T. Placzek, K. Benkler

Für die Auslegung und Nachrechnung von Getrieben steht dem Konstrukteur eine ganze Reihe effizienter EDV-Programme zur Verfügung. Sie ermöglichen es, in relativ kurzer Zeit ein Getriebe zu entwerfen und rechnerische Tragfähigkeitsnachweise zu erbringen. Die Anwendung dieser Programme soll im folgenden am Beispiel der Konstruktion und Berechnung des sogenannten virtuellen FVA-Getriebes gezeigt werden. Dieses in Bild 1 als Prinzipskizze dargestellte Kegelstirnradgetriebe wurde als fiktives Anwendungsbeispiel zur Untersuchung der Einsatzfähigkeit der verschiedenen FVA-Programme bei der Getrieberechnung entworfen. Die Konzeption dieses Getriebes ist darauf ausgerichtet, daß möglichst alle FVA-Programme (siehe Tabelle) daran getestet und dafür angewendet werden können. Mit dem virtuellen FVA-Getriebe kann damit ein komplettes Anwendungsbeispiel für die verschiedenen FVA-Programme bereitgestellt werden. Es wurde darauf geachtet, daß alle für die Berechnungen wichtigen Details spezifiziert und den Programmanwendern mitgeteilt werden konnten.

1. Auslegung und Konstruktion des Getriebes

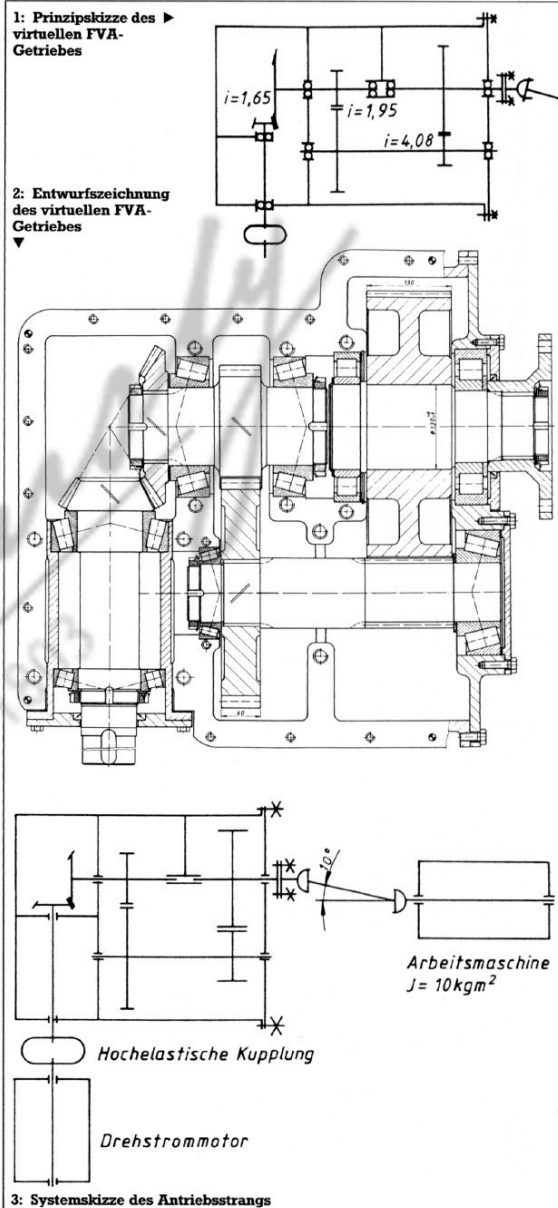
Das Konzept des virtuellen FVA-Getriebes war vom FVA-Arbeitskreis „EDV-Berechnungen“ durch eine Prinzipskizze (Bild 1) vorgegeben. Beim Entwurf wurden zunächst die Hauptabmessungen der Verzahnungen bestimmt, anschließend die Welle-Nabe-Verbindungen und Lagerungen [1] festgelegt. Das Getriebegehäuse wurde als Gußkonstruktion ausgeführt (Bild 2). Die übrigen Elemente des Antriebsstranges (Bild 3), bestehend aus einem Gleichstrommotor, einer hochelastischen Kupplung und einer Kreuzgelenkwelle, wurden aus Herstellerkatalogen anhand der vorliegenden Betriebsdaten ausgewählt und die Verbindungselemente (Wellenzapfen, Kupplung) am Getriebe vorgesehen. Die Arbeitsmaschine wurde nicht näher beschrieben, es wurde lediglich das Massenträgheitsmoment sowie ein zeitlich konstanter Verlauf des an der Arbeitsmaschine wirkenden Drehmomentes vorgegeben.

1.1. Auslegung und Tragfähigkeitsnachweis der Kegelradstufe

Mit den Vorgaben aus der Prinzipskizze (Bild 1), bestehend aus Drehmoment, Drehzahl und Übersetzungsverhältnis, kann die Verzahnung, aufbauend auf Erfahrungen an bewährten Kegelradgetrieben, nach Niemann/Winter [3] dimensioniert werden. Ebenso kann man von firmeneigenen Erfahrungen ausgehen. Zu den damit festgelegten Verzahnungsabmessungen werden Angaben über die verwendeten Werkstoffe und über das Öl hinzugefügt und die übrigen Verzahnungsabmessungen sowie die Tragfähigkeiten gemäß der Rechenvorschrift nach DIN 3991 [4] mit dem Kegelradnormprogramm [5] ermittelt. Durch Variation des Moduls oder der Zahnbreite findet man in kurzer Zeit eine Verzahnung, die bei minimalem Bauraum die geforderten Sicherheiten gewährleistet.

Eine genaue Untersuchung des Lauf- und Beanspruchungsverhaltens der Kegelradstufe erlaubt die „Programmkette Kegelradberechnung“ [6]. Für die drei verschiedenen Verzahnungsarten Gleason, Oerlikon und Klingelnberg existieren Vorprogramme,

Prof. Dr.-Ing. Hans Winter ist Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Leiter der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) an der TU München, ferner Herausgeber der „antriebstechnik“; Dipl.-Ing. Thomas Placzek ist Akademischer Rat a. Z., Dipl.-Ing. Karl Benkler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl.



mit denen die Konstruktionsmaße, Einstelldaten und Kennzahlen für die Maschinenkinematik und -geometrie sowie die Verzahnungswerkzeuge festgelegt werden. Mit Hilfe der Vorprogramme erstellt man Datensätze für die „Programmkette Kegelradberechnung“.

Das Programmsystem „Kegelradkette“ generiert durch Simulation des Verzahnungsprozesses ein Modell der Kegelradflankengeometrie. Die Flankenform und EASE-OFF-Charakteristik¹⁾ hängen stark vom gewählten Herstellprozeß ab. Bei der rechnerischen Zahnkontaktanalyse werden die Zahnflanken in Einbauposition lastfrei aufeinander abgewälzt. Man erhält unter anderem die EASE-OFF-Topographie, die Berührlinien und das Kontakttragbild, das sich unter Last möglichst in der Zahnmitte befinden sollte. Für Festigkeitsuntersuchungen generiert die „Programm-kette Kegelradberechnung“ eine Finite-Elementstruktur aus acht-knotigen Hexaederelementen. Aus Steifigkeiten und Deformationen der Berührpunkte werden Kraftverläufe entlang der Berührlinien errechnet. Als Ergebnisse werden Flankenpressung, Steifigkeitsverlauf und Drehwegabweichung unter Last sowie die Isolinen der Zahnfußspannung graphisch dargestellt. Mit den Ergebnissen der Berechnungen kann eine EASE-OFF-Topographie als Vorgabe für notwendige Maschineneinstellkorrekturen vorgeschlagen werden.

1.2. Auslegung und Tragfähigkeitsnachweis der Stirnradstufen

Aus Übersichtsrechnungen, die sich auf Erfahrungswerte für Industriegetriebe nach Niemann/Winter [2] stützen, oder aufgrund firmeneigener Erfahrungen bestimmt man die Hauptabmessungen (Modul, Ritzeldurchmesser, Schrägungswinkel, Achsabstand, Zahnbreite) der beiden Stirnradstufen. Bei der ersten Stirnradstufe soll aufgrund der hohen Drehzahlen in vorliegendem Beispiel eine Hochverzahnung verwendet werden, um eine besondere Laufruhe zu erzielen. Die Verzahnungsgeometrie kann durch interaktive Eingabe der obengenannten Verzahnungsgrunddaten mit dem Programm HVOPT [7] ausgelegt werden. HVOPT erstellt einen Datensatz zur Berechnung der Verzahnungsgeometrie mit dem „Stirnradprogramm“ [8] unter Berücksichtigung gegebener Herstellwerkzeuge. Wenn die Verzahnungsgeometrie kinematisch fehlerfrei ist, wird der Datensatz mit einem Editor durch Tragfähigkeitsdaten ergänzt.

Der Tragfähigkeitsnachweis der Stirnradstufen nach DIN 3990 [9] oder anderen Verfahren, z. B. nach den Vorschriften verschiedener Schiffahrtsklassifikationsgesellschaften, wird mit dem „Stirnradprogramm“ durchgeführt. Die Tragfähigkeitskenngrößen umfassen übertragene Momente, Werkstoffkennwerten, Schmierstoffcharakteristika, Faktoren zur Berücksichtigung von Verformungs- und Schwingungseinflüssen ($K_{H\alpha}$, K_{HB} , K_V). Der Breiten-einflussfaktor $K_{H\beta}$ kann für die Berechnung an der 2. Stirnradstufe fest vorgegeben werden, weil die durch Wellen- und Zahnradverformungen hervorgerufenen ungleichmäßigen Belastungen über der Zahnbreite mit dem Ritzelkorrekturprogramm [10, 11] ermittelt und durch einen Korrekturschliff ausgeglichen werden sollen (siehe Abschnitt 1.4). Bei diesen Auslegungsberechnungen werden die Haupt-Verzahnungsdaten so lange variiert, bis eine Verzahnungsgeometrie vorliegt, die für den Anwendungsfall einen guten Kompromiß aus geforderten Sicherheiten der Zahnflanken-, Zahnfuß- und Freßtragfähigkeit und kleinem Bauvolumen darstellt.

Mit dem Programm HSSEI/KALK [12] können die Kostenstrukturen für die Zahnradfertigung der einsatzgehärteten Räder kalkuliert werden. Mit Eingabe der Losgröße, Zähnezah, Modul, Eingriffswinkel, Schrägungswinkel, Zahnbreite und Profilverschiebungsfaktor erhält man eine Kostenstrukturanalyse des Herstellungsprozesses. Die Ergebnisprotokolle enthalten die Zeiteile der einzelnen Arbeitsgänge und die Herstellkosten der Zahn-räder.

1.3. Auswahl der Welle-Nabe-Verbindungen

Wenn die Verzahnungen festgelegt sind, kann man sich mit dem Programm WENA2²⁾ einen Überblick über die Baugröße aller möglichen Welle-Nabe-Verbindungen für das zu übertragende Moment verschaffen. Der vom Programm erstellten Liste mit Welle-Nabe-Verbindungen kann der Konstrukteur die für seine Einbauverhältnisse geeignetste entnehmen. Das Programm

WENA2 berechnet die Sicherheiten gegen Bauteilversagen der vorgegebenen Verbindungsarten, hier Paßfeder- und Keilwellenverbindungen sowie Querpfeßverband.

Für die Mitgliedsfirmen der FVA stehen die Programme ELPLAQ [13] zur Auslegung und Nachrechnung von Querpfeßverbänden und REMOP [14] für Paßfederberechnung zur Verfügung. Sie zeichnen sich besonders durch eine einfache Handhabung aus, weil nur eine minimale Anzahl von Eingabedaten notwendig ist.

Bei der Paßfederberechnung mit dem Programm REMOP wird ein exponentieller Verlauf der Lastlängsverteilung an der Paßfeder, ausgehend von der Drehmomentenleitung, berücksichtigt. Mit Vorgabe der Abmessungen und des Moments erhält man die minimale und maximale Flächenpressung in der Nabe. Zur Berechnung einer Sicherheit kann eine zulässige Flächenpressung vorgegeben werden.

Mit dem Programm ELPLAQ können sämtliche bei der Auslegung rein elastisch und elastisch-plastisch beanspruchter Querpfeßverbände erforderlichen Festigkeits- und Verformungs-berechnungen ausgeführt werden. Bei den Berechnungen wird ein ebener Spannungszustand vorausgesetzt. Die Glättung der Rauheitsspitzen nach DIN 7190 wird berücksichtigt.

1.4. Lagerauswahl und Ermittlung der Verzahnungskorrekturen

Für die Auswahl der Lager müssen die Lagerkräfte berechnet werden. Hierfür kann man das Programm RIKOR [10, 11] verwenden. Mit einer minimalen Anzahl von Eingabedaten (vgl. Echodruck in Bild 4) lassen sich die Wellenverformungen und radialen Lagerkräfte berechnen. Zur Eingabe der Wellenbelastungen wird auf die Welle ein rechtwinkliges, rechtsdrehendes u - v - w -Koordinatensystem gelegt, wobei die u -Koordinate auf der Wellenachse liegt. Den Ursprung legt man am zweckmäßigsten an den Anfang der Welle. Die Wellengeometrie, die Position der Zahnräder sowie die eingeleiteten Kräfte und Momente werden in Abhängigkeit der axialen u -Koordinate eingegeben ($u > 0$). Das Programm RIKOR ist im wesentlichen ein Stirnradprogramm. Die aus den Zahnkräften der Kegelradstufe auf die Wellen wirkenden Belastungen müssen deshalb als äußere Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente für die Berechnungen mit RIKOR vorgegeben werden. Auf die Kegelritzelle werden also im Bereich der Verzahnung eine Querkraft, ein Biege- und ein Torsionsmoment eingeleitet. Das Biegemoment resultiert aus der axialen Zahnkraft-Komponente des Kegelritzels, die außerhalb der Wellenmitte angreift. RIKOR berechnet die Biegelinien und die radialen Lagerbelastungen statisch bestimmter und vielfach überbestimmter Zahnradwellen. Wenn die Wellenbelastungen aus Stirnradstufen herrühren, wie bei der Zwischenwelle, die die erste und zweite Stirnradstufe miteinander verbindet, werden die Hauptdaten der sich im Eingriff befindenden Verzahnungen und die übertragenen Momente eingegeben (vgl. Echodruck Bild 5). Zur Bestimmung der Lagerkräfte bei statisch bestimmter Lageranordnung reicht ein überschlägiges Modell der Welle aus. Für die Berechnung der Breitenlastverteilung, die stark von der Wellenverformung abhängt, muß die Beschreibung der Wellengeometrie verfeinert werden. Des weiteren muß man die Steifigkeit der Lager berücksichtigen, um die hierdurch bedingte Wellenverlagerung zu erfassen. Das Lagerspiel kann man über einen Versatz der Lagerbohrung eingeben. RIKOR schlägt einen Korrekturschliff über der Zahnbreite vor, mit dem die Tragbildverschlechterung infolge Wellenverformungen ausgeglichen werden kann. Mit den in Bild 5 dargestellten Eingaben erhält man den in Bild 6 gezeigten Verlauf über der Zahnbreite.

1.5. Auslegung der Schraubverbindungen

Mit dem Programm BOLT3 [15] werden Schraubverbindungen gemäß der VDI-Richtlinie 2230 [16] berechnet. Aus der Geometrie der miteinander verschraubten Elemente und den auftretenden Belastungen erhält man als Ergebnis die Sicherheiten gegen Dauerbruch, Lockern der Schraubverbindung sowie Überschreiten der zulässigen Flächenpressungen.

1.6. Wärmehaushaltsberechnung und Ölleitungsdimensionierung

Das Programm WAEPRO [17] dient zur Berechnung des Wärme-

¹⁾ EASE-OFF = Summe der Korrektur bzw. Abweichung an Ritzel- und Radflanke

²⁾ Beim Programm WENA2 handelt es sich nicht um ein FVA-Programm. Dieses Programm wurde jedoch am Institut von Prof. Beitz für Berechnungen am virtuellen FVA-Getriebe verwendet.

FVA-PROGRAMM: RITZELKORREKTUR (VERS. D.12) VOM: 27. 5.1987 BLATT: 1

"VIRTUELLES" FVA-GETRIEBE; ANTRIEBSWELLE KEGELRADSTUFE

EINGABEFELDER 4 + 5 + 6

4. ANZAHL DER DATENZEILEN IN 5. , WERKSTOFFWERTE DER WELLE

NTP	EM	GM	RO	V
4				

5. ABMESSUNGEN, LAGERSTEIFIGKEIT, BELASTUNG (ZUSÄTZLICH ZU TU NACH 2)

U	DA	DI	CS	CD	QV	QW	FV	FW	HV	HW	TUA
95.											1100.
20	95.		-1								
282	95.		-1								
332							307.6	18021		-912.	-1100.

FVA-PROGRAMM: RITZELKORREKTUR (VERS. D.12) VOM: 27. 5.1987 BLATT: 2

"VIRTUELLES" FVA-GETRIEBE; ANTRIEBSWELLE KEGELRADSTUFE

C. WELLENBERECHNUNG FUER NENNLAST UND KH-BETA=1.0 E-MODUL = 206000. (N/MM2) DICHT = 0. (KG/M3)

1. VERFORMUNG:
KOMponenten V, W UND RESULTIERENDE VW MIT WINKEL PHIVW (VON V-RICHTUNG AUS RECHTSDREHEND GESEHEN). NRES = RESULT. NEIGUNG DER BIEGELINIE

U (MM)	V (MUEN)	W (MUEN)	VW (MUEN)	PHIVW (GRAD)	NRES (-)
.0	-1.0	1.0	1.3	134.9	.674E-04
20.0	.0	.0	.0	*****	.674E-04
282.0	.0	.0	.0	*****	.135E-03
332.0	-6.1	5.7	8.4	137.1	.194E-03

2. BELASTUNG
RESULTIERENDE RADIALKRAEFTE FRES, MOMENTE MRES UND STRECKENLAST QRES, JEWEILS MIT ZUGEHÖRIGEN WINKELN PHIDIE VON V-RICHTUNG AUS RECHTSDREHEND GESEHEN SIND. (***** = NICHT DEFINIERT)

U (MM)	FRES (KN)	PHIF (GRAD)	MRES (N*MM)	PHIM (GRAD)	QRES (N/MM)	PHIQ (GRAD)
.0	.000	*****	.0	*****	.0	*****
20.0	4.852	314.9	.0	*****	.0	*****
282.0	18.024	89.0	1271.1	224.9	.0	*****
332.0	18.024	89.0	912.0	270.0	.0	*****

D. RADIALE LAGERREAKTIONEN (NENNLAST, KH-BETA=1.0)

1. AUF WELLE WIRKENDE LAGERKRAEFTE (KN)
KOMponenten FV, FW, UND RESULTIERENDE FRES MIT WINKEL PHIF (SIEHE OBEN)

U (MM)	FV	FW	FRES	PHIF (GRAD)
20.0	-3.422	3.439	4.852	134.9
282.0	3.115	-21.460	21.685	278.3

4: Berechnung der Lagerkräfte und Wellenverformungen

FVA-PROGRAMM: RITZELKORREKTUR (VERS. D.12) VOM: 27. 5.1987 BLATT: 3

"VIRTUELLES" FVA-GETRIEBE; ANTRIEBSWELLE KEGELRADSTUFE

E. BIEGELINIEN DER WELLE IN V-, W-RICHTUNG, RESULTIERENDE R NENNLAST, KH-BETA=1.0 U (MM) R V W

U (MM)	R	V	W
.0	1.3	-1.0	1.0
6.1	.9	-.7	.7
12.3	.5	-.4	.4
18.4	.1	-.1	.1
24.6	.3	.2	-.2
30.7	.7	.5	-.5
36.9	1.1	.8	-.8
43.0	1.5	1.1	-1.1
49.2	1.9	1.4	-1.4
55.3	2.3	1.6	-1.7
61.5	2.7	1.9	-1.9
67.6	3.1	2.2	-2.2
73.8	3.5	2.4	-2.5
79.9	3.8	2.7	-2.7
86.1	4.2	2.9	-3.0
92.2	4.5	3.2	-3.2
98.4	4.8	3.4	-3.4
104.5	5.1	3.6	-3.6
110.7	5.4	3.8	-3.8
116.8	5.6	4.0	-4.0
123.0	5.9	4.1	-4.2
129.1	6.1	4.3	-4.3
135.3	6.3	4.4	-4.4
141.4	6.4	4.5	-4.6
147.6	6.6	4.6	-4.6
153.7	6.7	4.7	-4.7
159.9	6.7	4.8	-4.8
166.0	6.8	4.8	-4.8
172.1	6.8	4.8	-4.8
178.3	6.8	4.8	-4.8
184.4	6.7	4.7	-4.8
190.6	6.6	4.7	-4.7
196.7	6.5	4.6	-4.6
202.9	6.3	4.5	-4.5
209.0	6.1	4.3	-4.3
215.2	5.9	4.1	-4.1
221.3	5.6	3.9	-3.9
227.5	5.2	3.7	-3.7
233.6	4.8	3.4	-3.4
239.8	4.4	3.1	-3.1
245.9	3.9	2.8	-2.8
252.1	3.4	2.4	-2.4
258.2	2.8	2.0	-2.0
264.4	2.1	1.5	-1.5
270.5	1.4	1.0	-1.0
276.7	.7	.5	-.5
282.8	.1	-.1	.1
289.0	1.0	-.7	.7
295.1	1.9	-1.3	1.3
301.3	2.9	-2.0	2.0
307.4	3.9	-2.8	2.7
313.6	4.9	-3.5	3.4
319.7	6.0	-4.4	4.2
325.9	7.2	-5.2	4.9
332.0	8.4	-6.1	5.7

DURCHBIEGUNG, MASSTAB: .356 MUEN/SPALTE

FVA-PROGRAMM: RITZELKORREKTUR (VERS. D.12) VOM: 27. 5.1987 BLATT: 1

"VIRTUELLES" FVA-GETRIEBE; ZWISCHENWELLE

A. EINGABEDATEN

EINGABEFELDER 1 - 3

1. KENNZAHLEN, ALLGEM. VERZÄHNUNGSDATEN, LASTFAKTOREN

N	N	N	CG	MN	ALN	BETA	CPH	CB1	CB2	CB3	CB4
0201	8	20-21.7									
011	4	20									

2. LAGE UND DATEN DER EINGREIFENDEN ZAHNRÄDER, NENNDREHMOMENTE

TU	UIA	UIE	U2A	U2E	Z	X	DNA	V	W	HAO	FTA
-3539	48	111			39	0351.80		254			
271	401				25	0	108				
3539	271	401			102	0	416	254			

EINGABEFELDER 4 + 5 + 6

4. ANZAHL DER DATENZEILEN IN 5. , WERKSTOFFWERTE DER WELLE

NTP	EM	GM	RO	V
9				

5. ABMESSUNGEN, LAGERSTEIFIGKEIT, BELASTUNG (ZUSÄTZLICH ZU TU NACH 2)

U	DA	DI	CS	CD	QV	QW	FV	FW	HV	HW	TUA
85.											
19	90.										
48	90.										
54	97.										
110	108.										
269	95.										
404	90.										
431	90.										
477											

FVA-PROGRAMM: RITZELKORREKTUR (VERS. D.12) VOM: 27. 5.1987 BLATT: 6

"VIRTUELLES" FVA-GETRIEBE; ZWISCHENWELLE

M. ERFORDERLICHE BREITENKORREKTUR K' (MUEN) FUER KH-BETA = 1.0 (BEACHT FBU)

BERECHNET FUER NENNDREHMOMENT
LINKSPLANKE BEZUGL. U-RICHTUNG

UK	K	UK (MM)
1	.00	11.99
2	7.65	8.98
3	15.29	6.40
4	22.94	4.25
5	30.59	2.53
6	38.24	1.25
7	45.88	.41
8	53.53	.00
9	61.18	.03
10	68.82	.48
11	76.47	1.35
12	84.12	2.62
13	91.76	4.29
14	99.41	6.34
15	107.06	8.74
16	114.71	11.48
17	122.35	14.53
18	130.00	17.87

KORREKTUR GEGENUEBER EINGEGEBENER FLANKENLINIE
MASSTAB K: .425 (MUEN/SPALTE)

GRAPHISCHE AUSGABE ERSTELLT

ENDE DES DATENSATZES

6: Verlauf der Flankenkorrektur über der Zahnbreite

der Welle unter den gegebenen Einsatzbedingungen gewährleistet.

2.2.2. Untersuchung der Drehschwingungen im Antriebsstrang

Mit dem Programm DRESP2 [22, 23] werden die Anfahrbelastungen im Antriebsstrang rechnerisch simuliert. Dabei werden insbesondere die zusätzlichen Belastungen ermittelt, die durch stark schwingende Luftspaltemente der Drehstromantriebe beim Einschaltvorgang hervorgerufen werden können. Bei Berechnungen mit dem Programm DRESP wird das Hauptaugenmerk auf den gesamten Antriebsstrang gerichtet, deshalb reicht hier ein einfacheres Modell der Verzahnung aus. Zur Bildung eines dynamisch äquivalenten Ersatzsystems, mit minimaler Zahl von Freiheitsgraden, kann man die im Rahmen des FVA-Forschungsvorhabens „Modellfindung“ [24, 25] erarbeiteten Arbeitsblätter verwenden. Der Antriebsstrang (Bild 3) wird als diskretes Modell, bestehend aus Drehmassen, -federn, -dämpfern mit teilweise zeitvarianten Parametern (Kupplungs- und Momentenkenmlinie von An- und Arbeitsmaschine), aufgefaßt. Spiele zwischen den einzelnen Elementen werden mit berücksichtigt. Bei der Simulation des virtuellen FVA-Getriebes erhält man die Verläufe folgender Größen über der Simulationszeit aufgetragen:

- Erregermoment des Asynchronmotors,
- Belastungskennlinie der Arbeitsmaschine,
- Torsionsmomente in den Wellen,
- Steifigkeit der Zahnradstufen,
- Drehzahl des Asynchronmotors und der Arbeitsmaschine,
- Beschleunigungen in den Zahnradstufen,
- Kardanübersetzungen, Kardanwinkel und Gelenkwinkel.

2.2.3. Berechnung der Dynamik der Kreuzgelenkwelle

Mit dem Programm KGGAS [26] kann sich der Konstrukteur einen Überblick über die dynamischen Belastungen im Antriebsstrang verschaffen, die aus dem ungleichmäßigen Übertragungsverhalten der Kreuzgelenkwelle mit periodischer Anregung resultieren. Das Programm benötigt folgende Eingabegrößen:

- Massenträgheitsmomente vor, in und hinter der Gelenkwelle,
- Drehfedersteifigkeiten,
- Lagerreibungen,
- Motor- und Lastkenngrößen,
- Spiele,
- Dämpfungen,
- Beugewinkel.

Man erhält die Eigenfrequenzen und Amplitudenverläufe der einzelnen Elemente vor, in und hinter der Gelenkwelle.

Mit Hilfe des Rechenprogrammes BKK [27] kann das Biegeschwingungsverhalten der Gelenkwelle untersucht werden. Mit dem Verfahren der Übertragungsmatrizen werden die Biegeeigenfrequenzen und die Eigenvektoren berechnet. Der mit der Gelenkwelle verbundene Teil des Antriebsstranges wird in Wellenabschnitte (Felder) mit unterschiedlichen Abmessungen aufgeteilt. Die Lager und Gelenke werden durch Zwangsbedingungen erfaßt. Bei vorliegender Anordnung der Gelenkwelle, zwischen Getriebeausgangswelle und Welle der Arbeitsmaschine (vgl. Bild 3), ergibt sich ein Berechnungsmodell mit 17 Feldern und 4 Zwangsbedingungen (2 Gelenke und 2 starre Stützen). Als Ergebnis erhält man die Biege-Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenvektoren mit normierten Werten für Durchsenkung, Winkel, Moment und Querkraft.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich gezeigt, daß die in der Tabelle aufgeführten EDV-Programme zur Auslegung des virtuellen FVA-Getriebes gut eingesetzt werden können. Mit vertretbarem Aufwand konnten wichtige Aussagen über das Getriebe gemacht werden. In den Programmdokumentationen „Programmkette Kegelradberechnung“ und „Ölleitungsdimensionierung“ wurden die Berechnungen am virtuellen FVA-Getriebe bereits als Standardbeispiel aufgenommen.

Tabelle: Zusammenstellung der verwendeten Anwendungsprogramme ▶

Programm	Forschungsstelle	Funktion	Ergebnisse
Kegelrad-normprogramm	Prof. Winter FZG, TU München	Kegelradverzahnung auslegen und Tragfähigkeiten berechnen	Verzahnungsgeometrie, Sicherheiten zu Grübchen-, Zahnfuß-, Freßtragfähigkeit,
Programmkette Kegelradberechnung	Prof. Weck WZL, RWTH Aachen	Lauf- und Beanspruchungsverhalten der Kegelradstufe ermitteln	Kegelradgeometrie (Plot), Verzahnungsmaschineneinstellenden, Pressungs-, Spannungsverläufe
HVOPT	Prof. Weck WZL, RWTH Aachen	Stirnradverzahnung geräuscharm auslegen (Hochverzahnung)	Flanken-geometrie für vorgegebene Überdeckungsgrade, Datensatz f. Stirnradprogramm
Stirnradprogramm ESGETA	Prof. Winter FZG, TU München	Stirnradverzahnung auslegen und Tragfähigkeiten berechnen	Verzahnungsgeometrie (Plot), Sicherheiten zu Grübchen-, Zahnfuß-, Freßtragfähigkeit
HSSE/KALK1	Prof. Ehrlenspiel TU München	Stirnradverzahnung kostengerecht auslegen	Kostenstrukturen, Zeitanteile der einzelnen Arbeitgänge
RIKOR	Prof. Winter FZG, TU München	Wellenverformungen berechnen, Verzahnungskorrekturen bestimmen	Lagerkräfte, Wellenverformungen, Breitenlastfaktoren, Profil- und Breitenkorrekturen
WENA2	Prof. Beitz Prof. Praß TU Berlin	Welle-Nabe-Verbindungen auswählen, auslegen und nachrechnen	Liste der verwendbaren Welle-Nabe-Verbindungen, Sicherheiten für gegebene Welle-Nabe-Verbindungen
REMOP	Prof. Beitz Prof. Praß TU Berlin	Paßfedern auslegen und nachrechnen	Pressung in der Nabe, Sicherheit gegen Überschreiten der zulässigen Pressung
ELPLAQ	Prof. Kollmann TH Darmstadt	Querpreßsitz auslegen und nachrechnen	Pressung, Mindestübermaß, übertragbares Moment mit Querpreßsitz
BOLT3	Prof. Beitz Prof. Praß TU Berlin	Schraubverbindungen auslegen und nachrechnen	Anziehmoment, Sicherheiten gegen Dauerbruch, Überschreiten der zul. Flächenpressung, Lockern
WAEPRO	Prof. Winter FZG, TU München	Wärmehaushalt berechnen	Verlustleistungen, abgeführte Wärmeströme, stationäre Betriebsöltemperatur
Ölleitungsdimensionierungsprogramm	Prof. Holland TU Clausthal	Ölleitungen dimensionieren	Widerstandsdaten der Bauelemente des Ölkreislaufes: Druckabfall, Volumenstrom
DZP	Prof. Winter FZG, TU München	dynamische Zahnkräfte berechnen	Eigenfrequenzen, Eigenformen, statische Auslenkungen, Drehwegfehler Zahnkraftamplituden
UNIDAT UNIPLOTT	Prof. Weck WZL, RWTH Aachen	Getriebehochlauf simulieren	Schwingweg, Dynamikfaktor Verlauf der Eingriffsfedersteifigkeit
SR3	Prof. Glienicke TU Braunschweig	Biegeschwingungen der Antriebswelle berechnen	Schwingungs- und Lagerkraftamplituden bei Unwucht- und Kraft-erregung
	Prof. Wünsch GH Duisburg	Bildung eines Ersatzmodells für Drehschwingungsuntersuchungen	Ausgangs-/Bildwellenmodelle, Eigenwerte, Eigenvektoren, äußere Systemparameter
DRESP2	Prof. Peeken Prof. Troeder RWTH Aachen	Dehschwingungen im Antriebsstrang für Getriebehochlauf untersuchen	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Verformungspotentiale für Anlaufvorgang
KGGASS KGG	Prof. Stühler TU Berlin	Dreh- und Biegeschwingungen der Kreuzgelenkwelle berechnen	Systemparameter, Eigenfrequenzen Amplituden
BKK	Prof. Stühler TU Berlin	Biegeschwingungen der Kreuzgelenkwelle berechnen	Eigenfrequenzen, Eigenvektoren

Die Vorgehensweise soll in einem FVA-Handbuch in Form einer Lose-Blatt-Sammlung dokumentiert werden, um das Verständnis für die EDV-Programme und ihre Handhabung in den FVA-Mitgliedsfirmen zu erleichtern und zu fördern. Dieses FVA-Handbuch wird auch einen Überblick darüber geben, welche Programme der FVA für die Getriebeberechnung zur Verfügung stehen. Zukünftige FVA-Programme sollten am virtuellen FVA-Getriebe demonstriert und die Ergebnisse in das FVA-Handbuch aufgenommen werden.

Literaturhinweise:

- [1] Niemann, G.: Maschinenelemente, Band 1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1975
- [2] Niemann, G., und H. Winter: Maschinenelemente, Band 2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1983
- [3] Niemann, G., und H. Winter: Maschinenelemente, Band 3. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984
- [4] Norm DIN 3991 Teil 1-5: Grundlagen für die Tragfähigkeitsberechnung von Kegelrädern ohne Achsversetzung, Teil 1 bis 4: Normentwurf (Gelbdruck 1986)
- [5] Paul, M.: Kegelradnormprogramm – Kegelrad-Tragfähigkeitsberechnung. Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München. FVA-Forschungsheft Nr. 233, Frankfurt 1986
- [6] Stadtfeld, H.: Das Lauf- und Beanspruchungsverhalten bogenverzahnter Kegelrad- und Hypoidgetriebe. WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen. FVA-Forschungsreport, Frankfurt 1987
- [7] Salje, H.: Konstruktive Geräuschniederungsmaßnahmen durch gezielte Profilkorrekturen und Hochverzahnungen. FVA-Abschlußbericht (WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen). FVA-Forschungsheft Nr. 208, Frankfurt 1985
- [8] Hösel, Th.: Vergleich und Zusammenfassung von Zahnradberechnung mit Hilfe von EDV-Anlagen (Berechnung von Evolventen-Stirnradpaarungen). Berechnung der Paarung „Stirnrad-Werkzeug“, Benutzeranleitung, 6. Fassung (Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 209, Frankfurt 1986
- [9] Norm DIN 3990 12/87 Teil 1-5: Grundlagen für die Tragfähigkeitsberechnung von Gerad- und Schrägstirnradern
- [10] Hösel, Th.: Ritzelkorrektur. EDV-Programm zur Ermittlung der Zahnflankenkorrekturen zum Ausgleich der lastbedingten Zahnverformungen – Benutzeranleitung, 2. Fassung (Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 100, Frankfurt 1982
- [11] Placzek, T.: EDV-Programm zur Ermittlung der Zahnflankenkorrekturen zum Ausgleich der lastbedingten Zahnverformungen (Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 240, Frankfurt 1986
- [12] Fischer, D.: Herstellkosten scheibenförmiger Stirnzahnräder aus Einsatzstahl – Programmbeschreibung (Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 178, Frankfurt 1984
- [13] Gallowski, C.: EDV-Querpreßverbände. EDV-Programm zur Auslegung elastisch und elastisch-plastisch beanspruchter Querpreßverbände – Programmbeschreibung (Fachgebiet Maschinenelemente und Getriebe, Technische Hochschule Darmstadt). FVA-Forschungsheft Nr. 140, Frankfurt 1983
- [14] Miltzer, O.: Exakte Berechnung von Wellen-Naben-Paßfederverbindungen – Programmbeschreibung (Institut für Maschinenkonstruktion Konstruktionstechnik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 34, Frankfurt 1976
- [15] Grote, K. H., J. Feldhusen und K. Menzel: Die Berechnung von Schraubenverbindungen mit Hilfe des Programmsystems BOLT3 – Benutzerhandbuch – Version März 1984 (Institut für Maschinenkonstruktion Konstruktionstechnik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 200, Frankfurt 1985
- [16] VDI-Richtlinie 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1983
- [17] Funck, G.: EDV-Programm zur Berechnung des Wärmehaushaltes von Zahnradgetrieben WAEPRO. Teil I: Benutzeranleitung, Teil II: Programmbeschreibung (Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 197, Frankfurt 1985
- [18] Nier, R., M. Fritsche und D. Morawski.: Programmdokumentation Ölleitungsdimensionierung. Teil A: Benutzeranleitung, Teil B: Programmbeschreibung, Teil C: Kurzfassung der Theorie (Institut für Reibungstechnik und Maschinenkinetik, TU Clausthal). FVA-Forschungsheft Nr. 96 (im Druck)
- [19] Gerber, H., und R. Müller: Berechnung der inneren dynamischen Zusatzkräfte in gerad- und schrägverzahnten Stirnradgetrieben mittels EDV-Anlagen – EDV-Programm Dynamische Zahnkräfte DZP. Teil I: Benutzeranleitung, Teil II: Programmbeschreibung. Programmversion: 1. September 1985 – Programmdokumentation DZP3 (Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU München). FVA-Forschungsheft Nr. 231, Frankfurt 1986
- [20] Möllers, W.: Simulation von Verzahnungssteifigkeitsverläufen – Datenaufbereitungsprogramm (WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen). FVA-Forschungsheft Nr. 122, Frankfurt 1983
- [21] Han, D. C., und A. Meyer: Querschwingungen. Ergänzung der Programme zur Berechnung der selbst- und unwuchterregten Querschwingungen gleitgelagerter (und walzgelagerter) Rotoren mit Zusatzeinflüssen – Programmdokumentation (Institut für Maschinenkonstruktionslehre Universität Karlsruhe). FVA-Forschungsheft Nr. 139, Frankfurt 1983
- [22] Diekhans, C.: Instationäre Kupplungsbelastung durch Drehmomentstöße von Elektromotoren (Asynchron- und Synchronmotoren) – Programmbeschreibung DRESP (Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen). FVA-Forschungsheft Nr. 124, Frankfurt 1982
- [23] Kaufhold, J., und J. Schmidt: Simulationsprogramm zur Ermittlung der Beanspruchung von Antriebssträngen – Grundlagen, Programmbeschreibung Beispiele (Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen). FVA-Forschungsheft Nr. 211, Frankfurt 1985
- [24] Wunsch, D., und L. Garcia del Castillo: Modellfindung – Experimentelle und modellhafte Ermittlung dynamischer Belastungen torsionsschwingungsfähiger Systeme – Abschlußbericht Teil A (Fachbereich Maschinenbau, Institut für Konstruktionslehre, Universität Duisburg). FVA-Forschungsheft Nr. 213, Frankfurt 1986
- [25] Wunsch, D., und L. Garcia del Castillo: Modellfindung – Lösungs- und Operationskatalog zur Modellfindung mechanischer Torsionsschwingungssysteme – Abschlußbericht Teil B (Fachbereich Maschinenbau, Institut für Konstruktionslehre, Universität Duisburg). FVA-Forschungsheft Nr. 214, Frankfurt 1986
- [26] Stühler, W., und B. Günther: Einfluß des Spiels auf Dreh- und Biegeschwingungen an Kreuzgelenkantrieben – Programmbeschreibung für das Rechenprogramm KGGAS (Institut für Mechanische Schwingungslehre und Maschinendynamik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 96, Frankfurt 1981
- [27] Stühler, W., und K.-J. Schwahn: Biegeschwingungsverhalten von Celenkwellen in Antriebsstäben – Programmbeschreibung und Benutzeranleitung für das Rechenprogramm BKK (Institut für Mechanische Schwingungslehre und Maschinendynamik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 216/17, Frankfurt 1986