

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 Programm anwendern mitgeteilt werden konnten.

1. Auslegung und Konstruktion des Getriebes

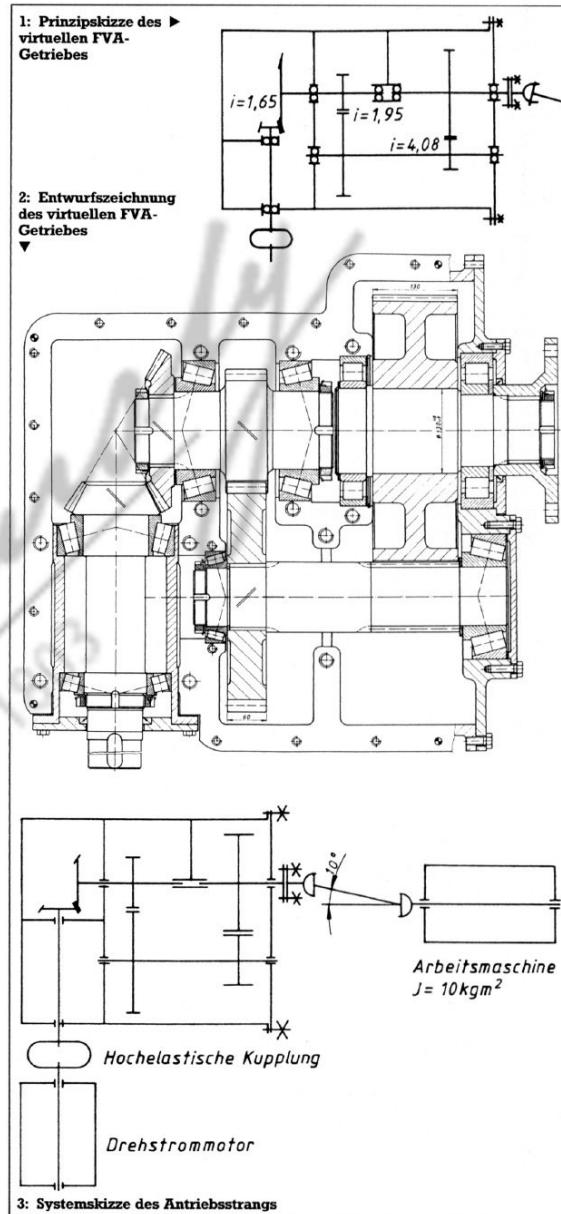
Das Konzept des virtuellen FVA-Getriebes war vom FVA-Arbeitskreis „EDV-Berechnungen“ durch eine Prinzipskizze (Bild 1) vorgegeben. Beim Entwurf wurden zunächst die Hauptabmessungen der Verzahnungen bestimmt, anschließend die Welle-Nabe-Verbindungen und Lagerungen [1] festgelegt. Das Getriebegehäuse wurde als Gußkonstruktions 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 Verbindungsselemente (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 Drehmoments 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 Getriebbau (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 Verzahnungswerzeuge 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 „Programmkette Kegelradberechnung“ eine Finite-Elementenstruktur 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 Zahnußspannung graphisch dargestellt. Mit den Ergebnissen der Berechnungen kann eine EASE-OFF-Topographie als Vorgabe für notwendige Maschineneinstellkorrekturen vorschlagen werden.

1.2. Auslegung und Tragfähigkeitsnachweis der Stirnradstufen

Aus Überschlagsrechnungen, die sich auf Erfahrungswerte für Industriegerüte nach Niemann/Winter [2] stützen, oder aufgrund firmeneigener Erfahrungen bestimmt man die Hauptabmessungen (Modul, Ritzeldurchmesser, Schräglungswinkel, 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 Schifffahrtsklassifikationsgesellschaften, wird mit dem „Stirnradprogramm“ durchgeführt. Die Tragfähigkeitskenngrößen umfassen übertragene Momente, Werkstoffkenndaten, Schmierstoffcharakteristika, Faktoren zur Berücksichtigung von Verformungs- und Schwingungseinflüssen (K_{Ha} , K_{HB} , K_y). Der Breiteinflußfaktor K_{HB} kann für die Berechnung an der 2. Stirnradstufe fest vorgegeben werden, weil die durch Wellen- und Zahnräderverformungen 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-, Zahnuß- und Freßtragfähigkeit und kleinem Bauvolumen darstellt.

Mit dem Programm HSSE1/KALK [12] können die Kostenstrukturen für die Zahnrädfertigung der einsatzgehärteten Räder kalkuliert werden. Mit Eingabe der Losgröße, Zähnezahl, Modul, Eingriffswinkel, Schräglungswinkel, Zahnbreite und Profilverhörsfaktor erhält man eine Kostenstrukturanalyse des Herstellungsprozesses. Die Ergebnisprotokolle enthalten die Zeittanteile der einzelnen Arbeitsgänge und die Herstellkosten der Zahnräder.

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 geeignete entnehmen. Das Programm

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

Für die Mitgliedsfirmen der FVA stehen die Programme ELPLAQ [13] zur Auslegung und Nachrechnung von Querpreßverbänden 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 Drehmomenteinleitung, 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 beanspruchte Querpreßverbände erforderlichen Festigkeits- und Verformungsberechnungen 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 radialem 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 Zahnräden der Kegelradstufe auf die Wellen wirkenden Belastungen müssen deshalb als äußere Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente für die Berechnungen mit RIKOR vorgegeben werden. Auf die Kegelritzelwelle 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 radialem Lagerbelastungen statisch bestimmter und vielfach überbestimmter Zahnräderwellen. 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

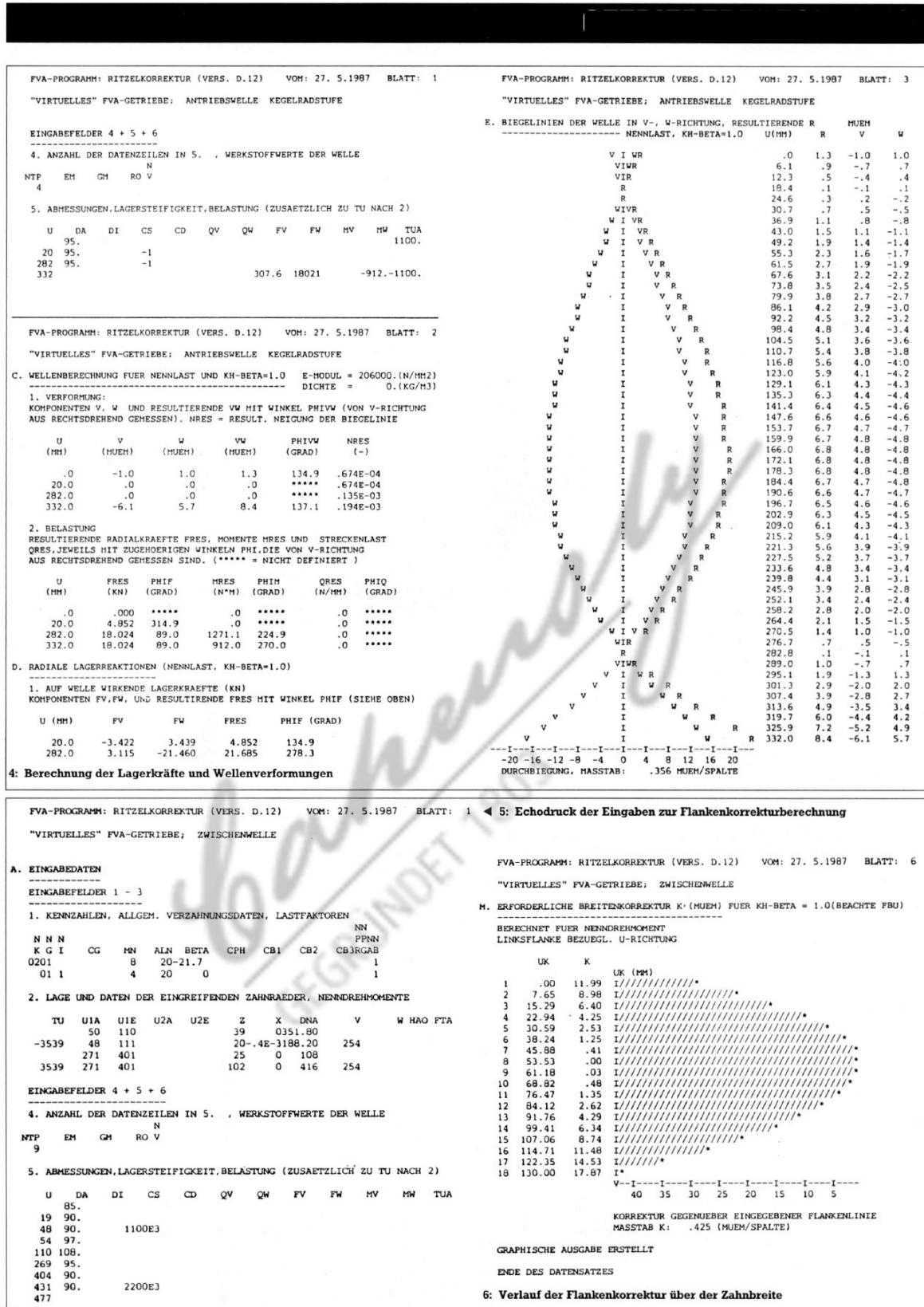
Mit dem Programm BOLT3 [15] werden Schraubverbindungen gemäß der VDI-Richtlinie 2230 [16] berechnet. Aus der Geometrie der miteinander verschraubten Elementen und den auftretenden Belastungen erhält man als Ergebnis die Sicherheiten gegen Dauerbruch, Lockern der Schraubverbindung sowie Überschreiten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

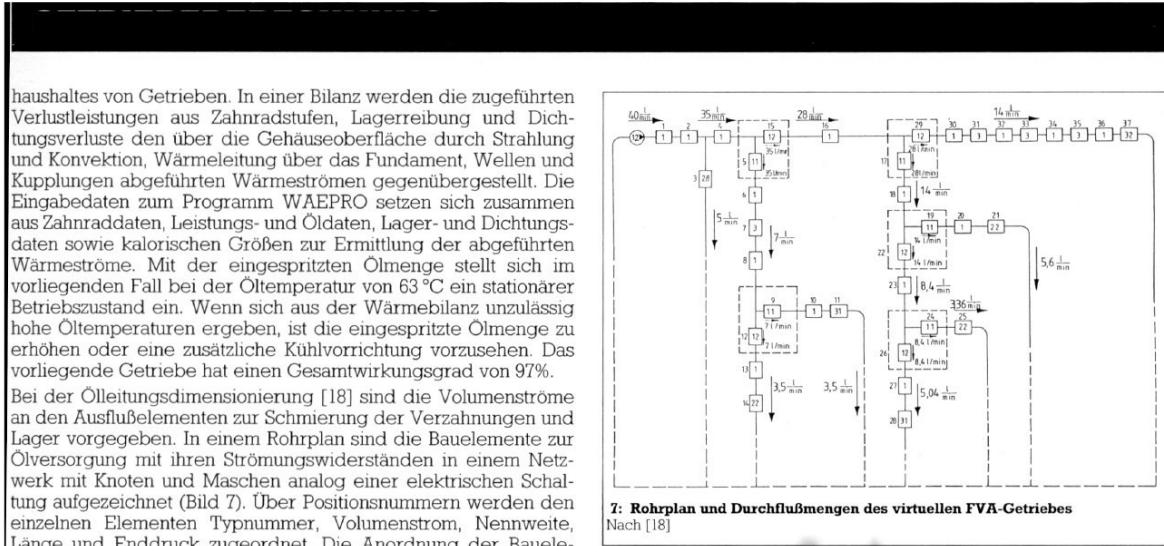
1.6. Wärmeaushaltsberechnung und Ölleitungsdimensionierung

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.





haushalten von Getrieben. In einer Bilanz werden die zugeführten Verlustleistungen aus Zahnraddrehmoment, Lagerreibung und Dichtungsverluste den über die Gehäuseoberfläche durch Strahlung und Konvektion, Wärmeleitung über das Fundament, Wellen und Kupplungen abgeführten Wärmeströmen gegenübergestellt. Die Eingabedaten zum Programm WAEPROM setzen sich zusammen aus Zahnraddaten, Leistungs- und Oldaten, Lager- und Dichtungsdaten sowie kalorischen Größen zur Ermittlung der abgeführten Wärmeströme. Mit der eingespritzten Ölmenge stellt sich im vorliegenden Fall bei der Ölttemperatur von 63°C ein stationärer Betriebszustand ein. Wenn sich aus der Wärmebilanz unzulässig hohe Öltemperaturen ergeben, ist die eingespritzte Ölmenge zu erhöhen oder eine zusätzliche Kühlvorrichtung vorzusehen. Das vorliegende Getriebe hat einen Gesamtwirkungsgrad von 97%.

Bei der Ölleitungsdimensionierung [18] sind die Volumenströme an den Ausflußelementen zur Schmierung der Verzahnungen und Lager vorgegeben. In einem Rohrplan sind die Bauelemente zur Ölversorgung mit ihren Strömungswiderständen in einem Netzwerk mit Knoten und Maschen analog einer elektrischen Schaltung aufgezeichnet (Bild 7). Über Positionsnummern werden den einzelnen Elementen Typnummer, Volumenstrom, Nennweite, Länge und Enddruck zugeordnet. Die Anordnung der Bauelemente im Netzwerk wird in das Programm über eine Eingabematrix der Netzkennzahlen eingegeben. Als Ergebnis erhält man unter anderem die Volumenströme und Druckverluste der Ölleitungselemente sowie die Absolutdrücke vor den einzelnen Elementen.

2. Untersuchung der Dynamik im Getriebe und im Antriebsstrang

2.1. Ermittlung der inneren dynamischen Zahnkräfte

Zur Ermittlung der dynamischen Zahnkräfte und zur Bestimmung des Dynamikfaktors K_v nach der höherwertigen Methode A nach DIN 3990 [9] stehen zwei FVA-Programmsysteme zur Verfügung, die sich bezüglich der Komplexität des zugrundeliegenden Rechenmodells unterscheiden. Damit kann die auf einem einfacheren Rechenverfahren für K_v (Methode B) basierende Tragfähigkeitsrechnung wiederholt und abgesichert werden.

2.1.1. Programm Paket DZP

Zur Untersuchung eines Antriebssystems unter Verwendung einer genauen Modellierung der Eingriffsverhältnisse (Überdeckungsvergrößerung durch vorzeitigen Eingriff und verspäteten Ausgriff; Herstellabweichungen und lastabhängige Zahnpaarsteifigkeiten) wird das Programm DZP [19] verwendet. Im wesentlichen werden folgende Größen eingegeben:

- Hauptabmessungen der Verzahnungsgeometrie,
- Zahnnormalkraft im Sturzschliff,
- Zahnpaarsteifigkeitsverlauf über der Eingriffsstrecke,
- Konturen der Wellen,
- Dämpfungskennwerte,
- Verzahnungsabweichungen und Korrekturen.

Das Modell des Antriebsstranges umfaßt eine Getriebestufe mit sechs Freiheitsgraden und an beiden Zahnrädern angekoppelten Drehmassen. In der Schwingerkette des An- und Abtriebs kann für jeweils ein Federlement Drehflankenspiel berücksichtigt werden. Die äußere Belastung ist zeitinvariant und greift an den äußeren Drehmassen von An- und Abtrieb an. Mit dem Programm DZP können folgende Größen berechnet werden:

- Drehwegfehler, Verlauf über dem Drehweg und Fourieranteile,
- Kraftanregung, Verlauf über dem Drehweg und Fourieranteile,
- Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen,
- die dynamische Zahnkraft bzw. der Dynamikfaktor nach DIN 3990 [9] und dynamische Auslenkungen der Massen für:
 - * stationäre Schwingung,
 - * Quasi-Hochlauf (d. h. die Massenträgheitsmomente des Getriebes sind klein gegenüber An- und Abtriebsmaschine; die Winkelbeschleunigung ist konstant),
 - * Resonanzkurve.

Das Verhältnis von dynamischer Zahnkraft im eingeschwungenen

Zustand zur statischen Zahnkraft entspricht dem Dynamikfaktor $K_{v,A}$. Das Rechenprogramm stellt den Verlauf der dynamischen Zahnkraft über der Zahneingriffsfrequenz (\sim Drehzahl) graphisch dar.

2.1.2. Programmsystem UNIDAT/UNIDYN

Beim Programmsystem UNIDAT/UNIDYN [20] wird das Schwingungssystem in Analogrechner-Blockschaltweise abgebildet und anschließend ein Getriebehochlauf simuliert. Man erhält mit geringem Aufwand brauchbare Richtwerte zur Auslegung eines Getriebes. Den Berechnungen wird ein vereinfachtes Modell, ein vom Antriebsstrang entkoppeltes Getriebe, zugrundegelegt. Verzahnungsabweichungen bleiben unberücksichtigt. Zur Berücksichtigung von Verzahnungsabweichungen muß im Einzelfall eine geeignete Rechenschaltung entworfen und manuell ein Datensatz für das Programm UNIDYN erstellt werden.

Das Programm UNIDAT erstellt aus folgenden Eingaben einen Datensatz für UNIDYN:

- Gesamtüberdeckung,
- kleinste Einzelfedersteifigkeit,
- größte Einzelfedersteifigkeit,
- Lehr'sches Dämpfungsmaß,
- Zahnflankenspiel,
- Zahneingriffsfrequenz,
- spezifische Zahnkraft.

Mit dem Programm UNIDYN wird das Zeitverhalten für einen Getriebehochlauf simuliert. Mit Vorgabe der Zahneingriffsfrequenz $f = 0$ wird ein Getriebehochlauf bis zum 2,75fachen der Hauptresonanzfrequenz simuliert. Das zugehörige Graphikprogramm UNIPILOT zeichnet den Schwingweg, Dynamikfaktor und den Verlauf der Eingriffsfedersteifigkeit über der Simulationszeit (\sim Drehzahl) auf.

2.2. Ergänzende Untersuchungen der Dynamik im Getriebe und Antriebsstrang

2.2.1. Berechnung der Rotorschwingungen am Beispiel der Kegelritzelwelle

Die schnelllaufende Getriebeeingangsrolle soll mit dem Programm SR3 [21] auf Querschwingungen untersucht werden. Dem Programm wird die Wellenkontur längs der Wellenachse vorgegeben. Die Massen der auf der Welle sitzenden Kupplungshälften und der Wellenmutter, die zum Anstellen der Kegelrollenlager dient, werden als Zusatzmassen eingegeben. Bei den Wälzlagern werden die Massen der Lagerschalen, die Dämpfungskonstanten, die Hauptabmessungen (Innen-, Außendurchmesser, Lagerbreite) und die Lagerbelastungen zur Ermittlung der Lagersteifigkeiten eingegeben. Die Auswertung der Critical-Speed-Map zeigt, daß die Lager im vorliegenden Fall sehr steif sind und daß der Betriebsbereich des untersuchten Rotors weit unterhalb der ersten kritischen Eigenfrequenz liegt. Bei einer angenommenen Unwucht am Kegelrad und an der Kupplung ergeben sich Schwingungs- und Lagerkraftamplituden, die genügend weit unterhalb kritischer Werte liegen. Damit ist ein sicherer Betrieb



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 Luftspaltmomente 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 Momentenkennlinie von An- und Arbeitsmaschine), aufgefäßt. 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 Kreuzgelenkwellen

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

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

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

Mit Hilfe des Rechenprogrammes BKK [27] kann das Biegeschwingsverhalten der Gelenkwellen untersucht werden. Mit dem Verfahren der Übertragungsmatrizen werden die Biege-eigenfrequenzen und die Eigenvektoren berechnet. Der mit der Gelenkwellen verbundene Teil des Antriebsstranges wird in Wellenabschnitte (Felder) mit unterschiedlichen Abmessungen aufgeteilt. Die Lager und Gelenke werden durch Zwangsbedingungen erfaßt. Bei vorliegender Anordnung der Gelenkwellen, 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.

Programm	Forschungsstelle	Funktion	Ergebnisse
Kegelradnormprogramm	Prof. Winter FZG, TU München	Kegelradverzahnung auslegen und Tragfähigkeiten berechnen	Verzahnungsgeometrie, Sicherheiten zu Grübchen-, Zahnhfuß-, Freibtragfähigkeit,
Programmkette Kegelradberechnung	Prof. Weck WZL, RWTH Aachen	Lauf- und Beanspruchungsverhalten der Kegelradstufe ermitteln	Kegelradgeometrie (Plot), Verzahnungsmaschineneinstelldaten, Pressungs-, Spannungsverläufe
HVOPT	Prof. Weck WZL, RWTH Aachen	Stirnradverzahnung geräuscharm auslegen (Hochverzahnung)	Flankengeometrie für vorgegebene Überdeckungsgrade, Datensatz f. Stirnradprogramm
Stirnradprogramm EGGETA	Prof. Winter FZG, TU München	Stirnradverzahnung auslegen und Tragfähigkeiten berechnen	Verzahnungsgeometrie (Plot), Sicherheiten zu Grübchen-, Zahnhfuß-, Freibtragfähigkeit
HSSE/KALK1	Prof. Ehrlingspiel TU München	Stirnradverzahnung kostengerecht auslegen	Kostenstrukturen, Zeitanteile der einzelnen Arbeitsgänge
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	Wärmeaushaltung 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 Zahndrähte berechnen	Eigenfrequenzen, Eigenformen, statische Auslenkungen, Drehwegfehler Zahndrähteramplituden
UNIDAT/UNIDYN/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 Kreuzgelenkwellen berechnen	Systemparameter, Eigenfrequenzen Amplituden
BKK	Prof. Stühler TU Berlin	Biegeschwingungen der Kreuzgelenkwellen berechnen	Eigenfrequenzen, Eigenvektoren

Tabelle: Zusammenstellung der verwendeten Anwendungsprogramme ▶



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 Kegelräder 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] Stadtfield, H.: Das Lauf- und Beanspruchungsverhalten bogenverzahnter Kegelrad- und Hypoidgetriebe. WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen. FVA-Forschungsbericht, Frankfurt 1987.
- [7] Saljé, H.: Konstruktive Geräuschründerungsmaßnahmen durch gezielte Profilkorrekturen und Hochverzahnungen. FVA-Abschlussbericht (WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen). FVA-Forschungsheft Nr. 208, Frankfurt 1988
- [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 Schrägstirnrädern
- [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-Forschungsbericht 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] Miltitzer, O.: Exakte Berechnung von Wellen-Naben-Paffederverbindungen – 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 Wärmeaushaltes 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. Fritzsche und D. Morawski.: Programmdokumentation Ölleitungsdimensionierung. Teil A: Benutzeranleitung, Teil B: Programmbeschreibung, Teil C: Kurzfassung der Theorie (Institut für Reibungstechnik und Maschinenkinematik, 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 – Datenaufbereitungssprogramm (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 unwuchtregten Querschwingungen gleitgelagerter (und wälzgelagerter) Rotoren mit Zusatzeinflüssen – Programmdokumentation (Institut für Maschinenkonstruktionslehre Universität Karlsruhe). FVA-Forschungsheft Nr. 139, Frankfurt 1983
- [22] Diekhans, G.: Instationäre Kupplungsbelastung durch Drehmomentstoße 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] Wünsch, 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] Wünsch, 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] Stuhler, W., und B. Günther: Einfluß des Spalls auf Dreh- und Biegeschwingungen an Kreuzgelenkantrieben – Programmbeschreibung für das Rechenprogramm KGGAS (Institut für Mechanische Schwingungslehre und Maschinendynamik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 95, Frankfurt 1981
- [27] Stuhler, W., und K.-J. Schwahn: Biegeschwingungsverhalten von Gelenkwellen in Antriebsstangen – Programmbeschreibung und Benutzeranleitung für das Rechenprogramm BKK (Institut für Mechanische Schwingungslehre und Maschinendynamik der TU Berlin). FVA-Forschungsheft Nr. 216/17, Frankfurt 1986