

KISSsoft AG
Frauwis 1
CH - 8634 Hombrechtikon
Telefon: +41 55 264 20 30
Fax: +41 55 264 20 33
Email: info@KISSsoft.ch

KISSSOFT
Berechnungssoftware für den Maschinenbau

KISSsys Anwendung:

Lebensdauerberechnung eines siebengängigen Getriebes mit Rückwärtsgang und Stirnradifferential



Stichworte: Differential, Schaltgetriebe, Lastkollektiv, Fahrzeuggetriebe

Letzte Änderung: 16. Aug. 2005

1 Aufgabenstellung

Ein Formel-1 Getriebe mit sieben Vorwärts- und einem Rückwärtsgang soll für verschiedene Rennstrecken auf seine Lebensdauer hin untersucht werden.

Neben der Schaltstufe wird eine Kegel- und eine Stirnradstufe betrachtet, gefolgt von einem Stirnradifferential. Für die Zahnräder des Differentials wird wie üblich keine Ermüdungsrechnung sondern ein statischer Nachweis erstellt.

Ziel ist es, verschiedene Verzahnungen zu vergleichen und auf Knopfdruck einen kompletten, umfassend dokumentierten Nachweis zu liefern.

2 Lösungsprinzip

In diesem Anwendungsbeispiel kommen mehrere Stärken von KISSsys zum Tragen: Das komplette Schaltgetriebe wird in seiner Kinematik abgebildet, Gänge können geschaltet (aktiviert, respektive deaktiviert) werden und über eine Schädigungsrechnung wird für alle Elemente im Getriebe (Verzahnung, Wälzlager und Wellen) je nach Lastkollektiv die Lebensdauer berechnet. Dazu ruft KISSsys einzelne KISSsoft Berechnungen für die Lebensdauerberechnung auf.

In KISSsoft, das über das KISSsys Model bedienbar ist, können die einzelnen Zahnräder optimiert werden.

Die Nachrechnung des kompletten Getriebes dauert selbst bei Verwendung eines Kollektivs mit einer hohen Anzahl Stufen höchstens ein paar Minuten.

Über Protokollfunktionen werden nach Abschluss der Optimierung sämtliche Berechnungen detailliert dokumentiert und in einem Word Dokument zusammengefasst.

3 Beschreibung des Modells

3.1 Aufbau des Getriebes

Es handelt sich um ein Getriebe mit sieben Vorwärtsgängen, alles Stirnräder. Über eine Zwischenwelle ist ein Rückwärtsgang schaltbar. Die Schaltstufe wird gefolgt von einer Kegelradstufe und einer Stirnradstufe. Das Abtriebs-Stirnrad dieser Stufe ist zugleich Träger der Differentialzwischenräder des Stirnraddifferentiales.

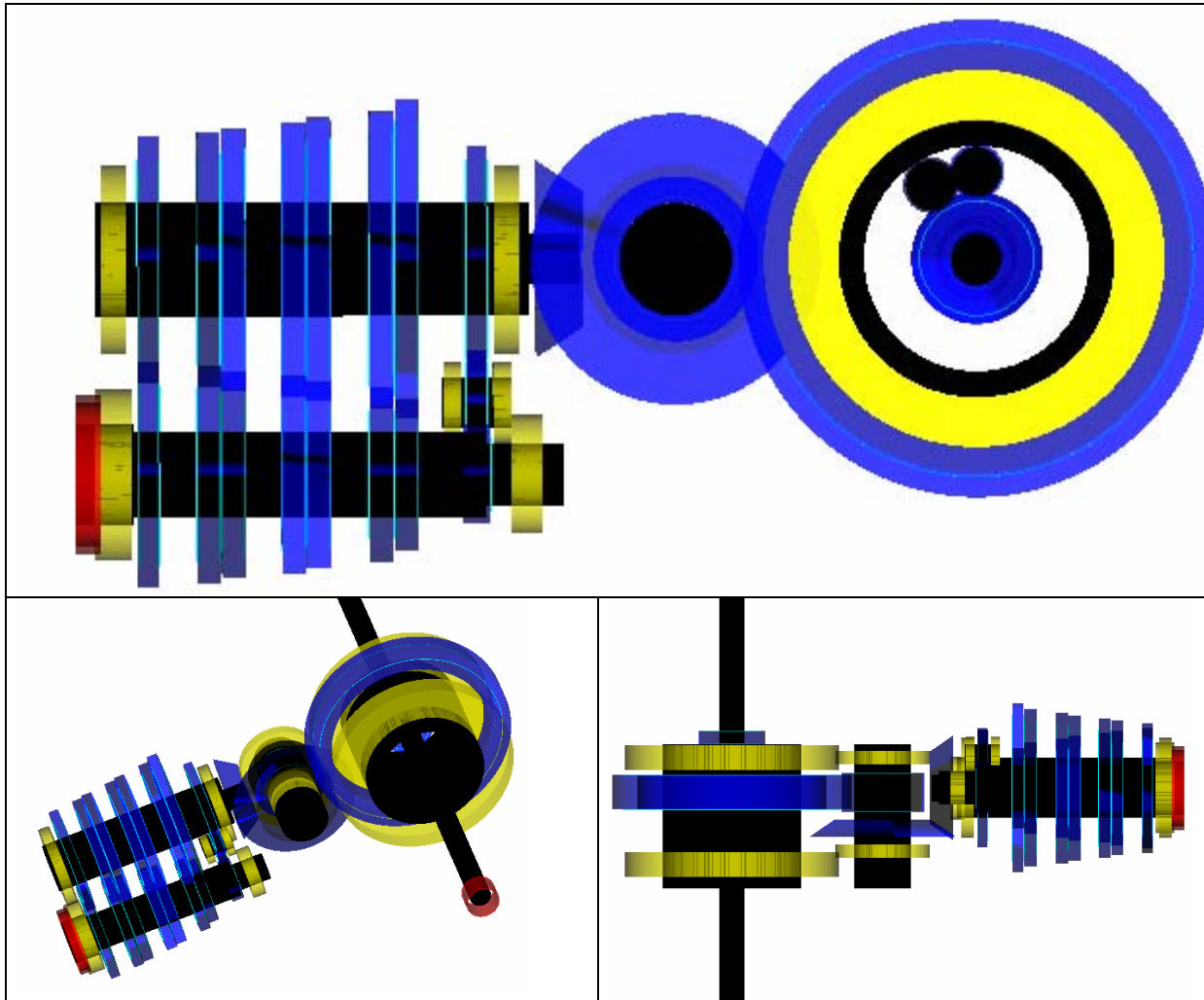


Abbildung 3.1-1 Aufbau des Getriebes: Schwarz: Wellen, Blau: Zahnräder, Gelb: Wälzlager, Rot: Leistungsein- bzw. ausgang. Vom Differential ist nur ein Satz Zwischenräder gezeigt.

Die Wellen, als Hohlwellen ausgeführt, sind allesamt über Zylinderrollenlager oder Kugellager gelagert.

Die dem Berechnungsmodell zu Grunde gelegte Kinematik bildet sämtliche Eigenschaften des Getriebes ab, insbesondere die Aktivierung/Deaktivierung der geschalteten Paarung/nicht geschalteten Paarungen, der Richtungsumkehr für den Rückwärtsgang sowie die Leistungsverzweigung im Stirnradifferential:

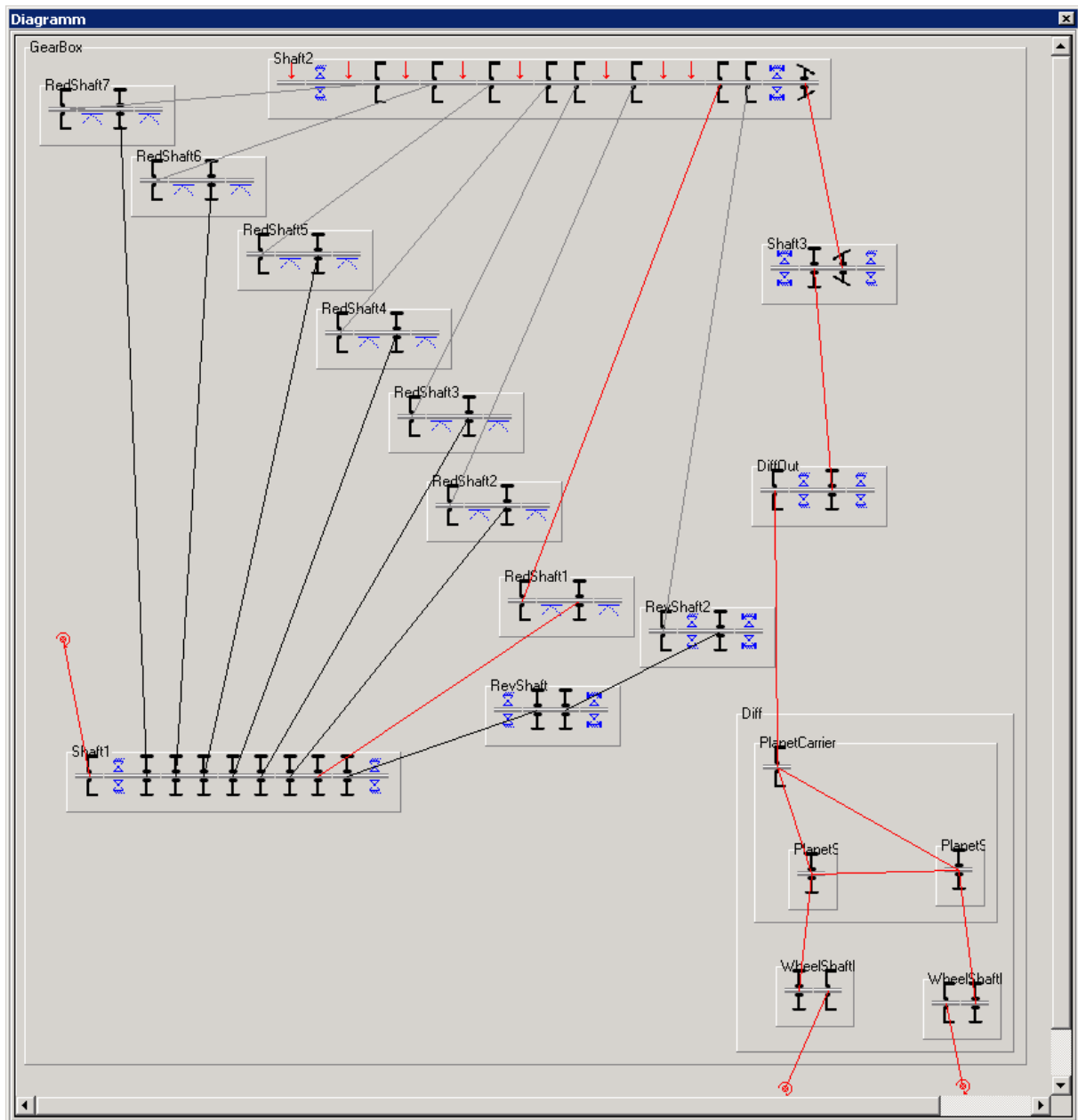


Abbildung 3.1-2 Prinzipskizze des Getriebes mit Leistungsfluss (rot), Maschinenelementen (Welle, Zahnrad, Kupplung, Lager) sowie Kräften (Pfeile).

3.2 Aufbau der Masken

Dem Anwender stehen in KISSsys verschiedene Ansichten des Modells zur Verfügung. Die Struktur des Getriebes ist in der Baumstruktur links dargestellt. Hier ist sichtbar, wie die Bauteile und die dazugehörigen Berechnungen gruppiert sind. Die Baumstruktur wird durch Copy/Paste aus einer Vorlagenbibliothek zusammgebaut. Darauf basierend wird dann der Leistungsfluss (rechts oben) abgeleitet und visualisiert. Die 3D Darstellung zeigt die räumliche Anordnung der einzelnen Elemente und ermöglicht auch einfachere Kollisionsprüfungen (Bauteil-Bauteil oder Bauteil-Gehäuse). Ein- und Ausgaben von Daten erfolgen über Tabellen, sogenannte User Interfaces. Diese sind frei programmierbar und können mit Resultaten, Funktionen, Listen oder Texten belegt werden. Für die Darstellung grosser Datenmengen ist besonders die 2D Plotfunktion zur Erzeugung von Diagrammen geeignet.

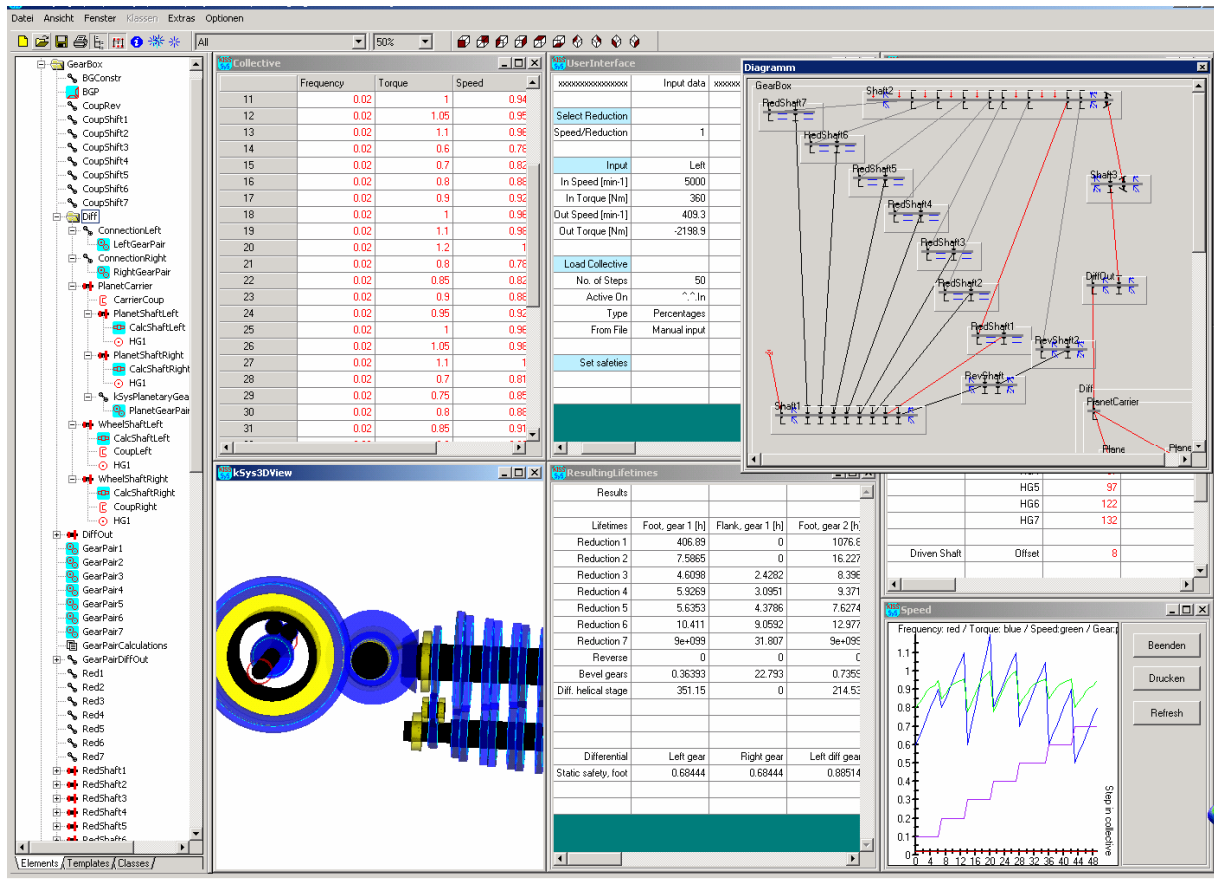


Abbildung 3.2-1 Ansichten des Modells. Links: Baumstruktur (logischer Aufbau). Rechts oben: Leistungsfluss. Rechts unten: 2D plot. Links unten: 3D Ansicht. Dazwischen: Tabellen.

Zu den einzelnen Elementen der Bedienung siehe unten.

3.3 Aufrufen der Berechnung

3.3.1 Lebensdauerberechnung ohne Lastkollektiv

Hier wird für eine gewählte Gangschaltung, einem Motoren-Drehmoment und –Drehzahl die Lebensdauer aller modellierten Zahnräder sowie Wälzlager bestimmt. Der Anwender macht dabei im User Interface folgende Angaben:

- Gewählter Gang
- Nenndrehzahl und Nennmoment
- Leistungsverteilung am Differential
- Angaben zur Schmiering
- Lastfaktor und Sollsicherheiten
- Art der Wälzlagerberechnung (L_{10} , erweiterte Lebensdauer nach FAG, sowie nach ISO281)

Nachdem diese Angaben gemacht sind, kann die Lebensdauerberechnung durch einen einfachen Funktionsaufruf (Doppelklick auf ein Feld „Calc. Lifetime“) gestartet werden. Die Definition der Nennleistung sowie die Auswahl des zu schaltenden Ganges erfolgt dabei komfortabel über Dialoge:

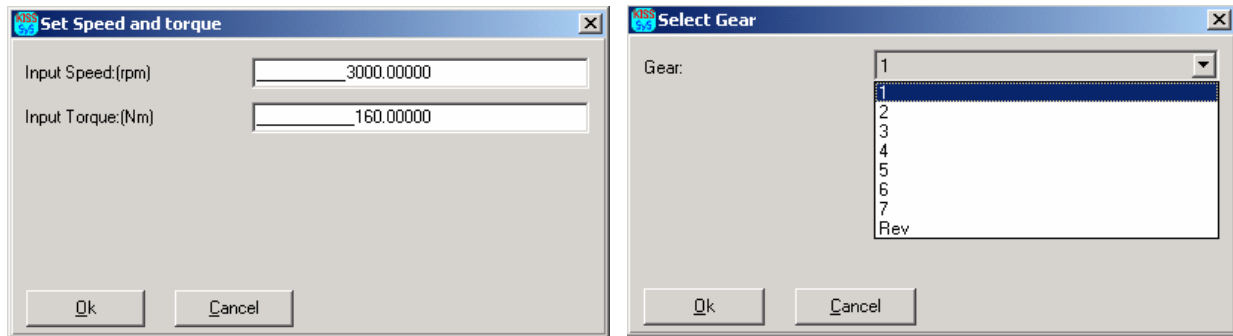


Abbildung 3.3-1 Links: Eingabe von Drehzahl und Drehmoment am Eingang. Rechts: Auswahl des zu schaltenden Ganges.

Gang wählen

Eingangsleistung definieren

Lastkollektiv auswählen/definieren

face		Input data		Kinematics		Execute analysis	
Select Reduction				Left	Right	Calc. Kinematic	Actual reduction
Speed/Reduction	1		Reduction	12.216	12.216	Calc. Lifetime	Using collective
						Calc. Lifetime	Actual reduction
Input	Left	Right					Create Report
In Speed [min-1]	5000		Power In	188.5			
In Torque [Nm]	360						
Out Speed [min-1]	409.3	409.3	Power Out	94.248	94.248		
Out Torque [Nm]	-2198.9	-2198.9	Efficiency	1			
			Parameters				Display windows
Load Collective			Lubrication			Show Gear Data	Show Results
No. of Steps	8		Lubricant	Oil: EP 68		Show Collective	Show3D
Active On	^^.In		Temperature	77	Ambient/Lubricant	Refresh 2D plot	Show Collective
Type	Percentages		Mode	oil bath lubrication			
From File	Manual input						
			Bear. calc. meth.	logue FAG (1999)			
Set safeties			Load Factor KA	1	No. of planet pins	7	
			Left/right speed	1	Use values <1		

Art der Wälzlagerberechnung Angaben zur Schmierung Berechnungen starten

Abbildung 3.3-2 User Interface zur Steuerung der Berechnung.

3.3.2 Lebensdauerberechnung mit Lastkollektiv

Neben den oben erwähnten Angaben ist nun ein Lastkollektiv auszuwählen respektive zu definieren. Der Anwender kann dabei wählen, ob er ein Lastkollektiv aus einer Datei lesen oder es manuell definieren will. Das Kollektiv wird dann in einer Tabelle gespeichert und kann graphisch dargestellt werden. Neben den Angaben über Häufigkeit, Drehmoment- und Drehzahlverlauf ist im Kollektiv auch die Schaltstellung codiert. Damit ist es möglich, eine komplette Fahrstrecke (z.B. eine Rennstrecke) abzubilden. Die Auswahl des Kollektivs erfolgt wieder über Dialoge:

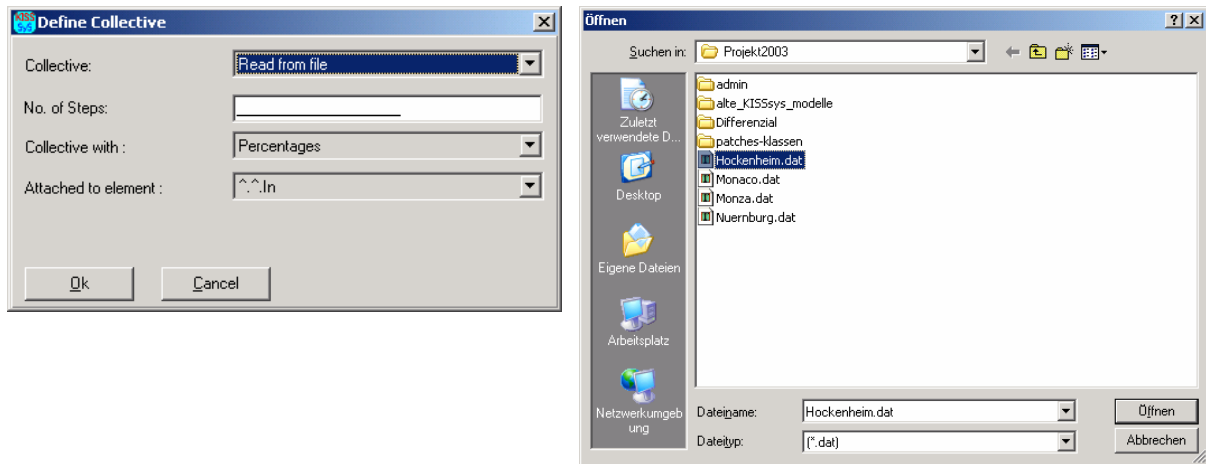


Abbildung 3.3-3 Links: Dialog zur Auswahl eines Kollektives. Rechts: Auswahl verschiedener Kollektive (hier Rennstrecken) über einen Windows Open File Dialog.

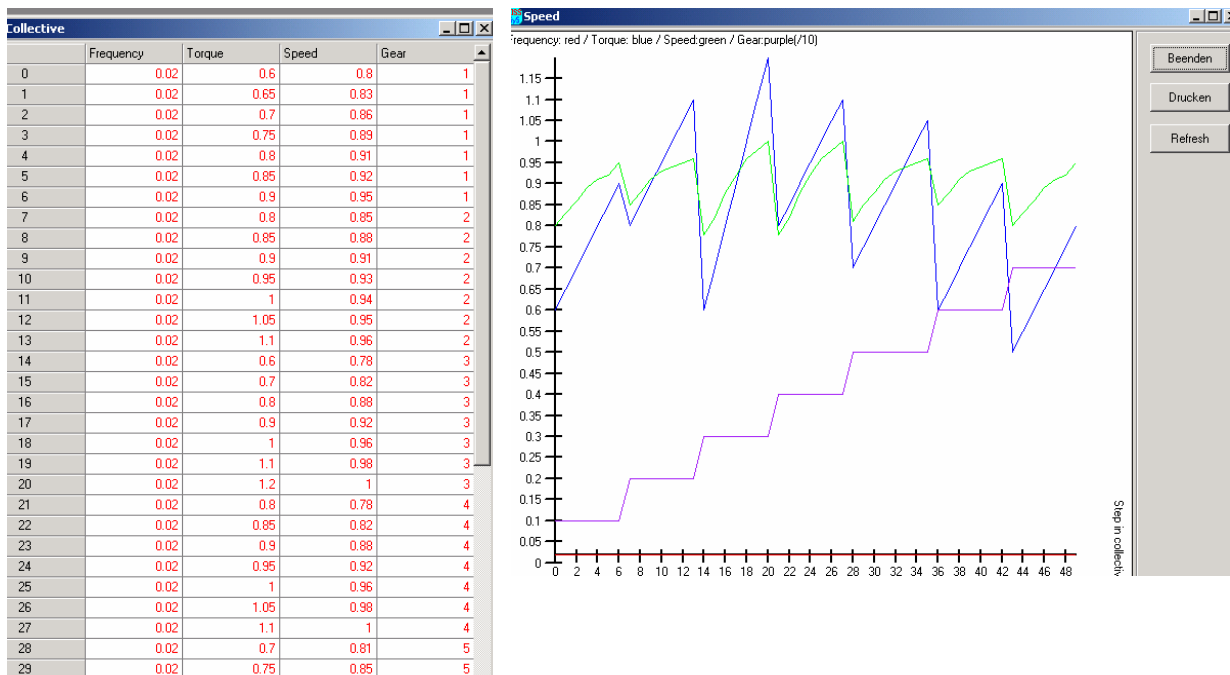


Abbildung 3.3-4 Links: Lastkollektiv in Tabellenform. Rechts: Graphische Repräsentation. (Die Werte sind aus Gründen der Geheimhaltung fiktiv).

Mit diesem eingelesenen (oder manuell definierten Kollektiv) wird nun eine Schädigungsrechnung für die Zahnräder und Wälzlager durchgeführt. Dabei wird in jedem Schritt die Schaltstellung gemäss den Angaben gesetzt und die Kinematik frisch berechnet.

3.4 Schädigungsrechnung

Die Schädigungsrechnung setzt in einem ersten Schritt die aktuelle Schaltstufe aktiv, berechnet danach die aktuelle Drehzahl und das aktuelle Drehmoment am Eingang und führt mit diesen Einstellungen die Berechnung der Kinematik neu aus.

Mit den daraus resultierenden Belastungen auf die einzelnen Elemente (die nicht geschalteten Stufen sehen keine Last) wird nun unter Berücksichtigung von Lastfaktoren und Sollsicherheiten eine partielle Schädigung bestimmt. Diese wird nun über alle Schritte des Kollektives aufsummiert. Die Berechnung einer äquivalenten Last ist in dieser Anwendung nicht sinnvoll, da die Steigung der Wöhlerlinie für die verschiedenen Bauteile unterschiedlich ist und die Kinematik des Getriebes sich über der Zeit ändert (durch das Schalten der Gänge).

Die Berechnung der Zahnfuß- respektive Zahnflankenlebensdauer kann nach DIN 3990, ISO 6336 oder AGMA 2001 erfolgen, dies gilt auch für die statischen Nachweise. Die der Wälzlager kann entweder als Standard L_{10} Rechnung, bzw. mit der erweiterten Lebensdauerberechnung nach Angaben FAG Katalog oder nach ISO 281 erfolgen. Die Festigkeit der verwendeten Materialien sowie die Eigenschaften des Schmiermittels werden aus einer KISSsoft Datenbank entnommen.

3.5 Ausgabe der Resultate, schriftlichen Nachweis generieren

Ebenfalls in einer Anwender Maske werden die errechneten Lebensdauern für die Wälzlager und für die Zahnräder dargestellt. Sind detailliertere Angaben erwünscht, können zu den einzelnen Berechnungen detaillierte KISSsoft Protokolle angefordert werden. Diese rtf Dateien können automatisch in einem Worddokument zusammengefasst werden, womit die Lebensdauerberechnung umfassend (rund 75 Seiten) dokumentiert ist. Der – häufig ungeliebte – Aufwand für eine saubere Dokumentation schrumpft damit auf wenige Minuten, wobei gleichzeitig die Fehleranfälligkeit reduziert und Reproduzierbarkeit verbessert wird.

Results										
Lifetimes	Foot, gear 1 [h]	Flank, gear 1 [h]	Foot, gear 2 [h]	Flank, gear 2 [h]	Foot, gear 3 [h]	Flank, gear 3 [h]				
							Driving shaft	Front bearing		641.16
Reduction 1	406.89	0	1076.8	0				Rear bearing		131.18
Reduction 2	7.5865	0	16.227	17.185			Driven shaft	Front bearing		549.65
Reduction 3	4.6098	2.4282	8.396	6.953				Rear bearing		2.1626
Reduction 4	5.9269	3.0951	9.371	7.3777			Bevel shaft	Left bearing		4.2454
Reduction 5	5.6353	4.3786	7.6274	8.3943				Right bearing		1.7249
Reduction 6	10.411	9.0592	12.977	14.782			Differential	Left bearing		6750.5
Reduction 7	9e+099	31.807	9e+099	41.228				Right bearing		753.49
Reverse	0	0	0	0	0	0				
Bevel gears	0.36393	22.793	0.7359	35.066						
Diff. helical stage	351.15	0	214.53	0						
Differential	Left gear	Right gear	Left diff gear	Right diff gear						
Static safety, foot	0.68444	0.68444	0.88514	0.88514						

Abbildung 3.5-1 Ausgegebene Resultate: Lebensdauern in h für alle sechs Wälzlager sowie der Zähne für Fuss- und Flankenfestigkeit. Weiter sind die Sicherheiten gegen Fressen angegeben.

4 Zusammenfassung

Ziel einer Getriebeauslegung im Rennsport ist es, eine vorgegebene Lebensdauer (im Bereich einiger weniger Stunden) bei möglichst tiefem Gewicht zu erreichen. Ein Überblick über die (Lastkollektiv-bewertete) Lebensdauer aller Elemente ist äusserst nützlich, da Schwachstellen einerseits und zu gross dimensionierte (also zu schwere) Elemente andererseits sofort sichtbar sind. Durch eine leicht modifizierte Verteilung der Zahnbreiten der einzelnen Gänge kann beispielsweise die Lebensdauer der verschiedenen Zahnräder problemlos ausgeglichen werden.

Da das Gewicht der Verzahnung im Wesentlichen von den Dimensionen der Zahnräder abhängt, ist die Bestrebung, diese möglichst klein/schmal zu halten. Der Aufwand für die Optimierung der Verzahnung wird dementsprechend hoch, die Zahl der untersuchten Varianten ebenso. Bei der Verwendung eines Modells wie oben beschrieben wird enorm viel Zeit gespart, da mehrere Änderungen simultan betrachtet werden können. Weiter von grossem Nutzen ist die Möglichkeit, das Getriebe mit geringem Zusatzaufwand für verschiedene Rennstrecken (Lastkollektive) durchzurechnen.

Einflüsse der Schmierung, Zahnradwerkstoffe oder Zahnformmodifikationen sind damit rasch quantifizierbar.