

Auslegung & Optimierung von mehrstufigen Getrieben

Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht, TU Dresden
Dr.-Ing. Tobias Schulze, DriveConcepts GmbH Dresden
Dipl.-Ing. Christian Hartmann-Gerlach, DriveConcepts GmbH Dresden

Abstract

Gear Boxes play an important role in mechanical engineering because of their moment and speed transmission possibilities. Design and optimization of a complete gearbox provide a lot of requirements to the designer. The complex gear box model consists of a large number of machine elements (shafts, gears, bearings, housing, seals, and shaft-hub connections).

The gearbox must be understood as a system with interactive partners. Next to calculation of kinematics, load capacities and life times of single elements aspects of load distribution and effective and noisy gear boxes become important.

Zusammenfassung

Die Globalisierung und die stetig wachsenden Kundenanforderungen stellen die Unternehmen vor immer neue Herausforderungen. Um dem wachsenden Kostendruck bei steigenden Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, sind die Unternehmen zu grundlegenden Umstellungen im Entwicklungsprozess gezwungen. Für den Maschinenbau spielen Getriebe mit ihrer Drehmoment- und Drehzahlübertragung eine enorm wichtige Rolle.

Die Auslegung und Optimierung eines kompletten Getriebes als Produkt stellt dabei hohe Anforderungen an Konstrukteur und Berechnungsingenieur. Das komplexe Modell eines Getriebes, welches aus einer Vielzahl von Maschinenelementen (Wellen, Zahnräder, Lager, Gehäuse, Dichtung, Welle-Nabe-Verbindungen,...) besteht, muss als System verstanden werden, dessen Einzelemente mehr oder weniger starken Abhängigkeiten unterliegen. Neben der Berechnung der Getriebekinematik, dem Nachweis der Tragfähigkeit und Lebensdauer der Einzelemente, treten zunehmend Aspekte wie Wirkungsgrad, Geräuschentwicklung sowie Lastverteilung der Verzahnung in den Vordergrund.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Getriebe mit der ständigen Forderung nach leichten Konstruktionen, Ressourcen schonenden Materialeinsatz bei gleichzeitig hohen Übertragungsleistungen führt zwangsweise zu immer größeren Leistungsdichten und zu höheren Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Hierbei kommen aufgrund der konstruktiven Vielfalt und Anwendbarkeit immer mehr Planetengetriebe in der gesamten Antriebstechnik zum Einsatz. Es werden ein- und mehrstufige Lösungen realisiert, mit einem oder mehreren An- bzw. Abtrieben. Weiterhin unterscheidet man nach der Art der Verzahnung in geradverzahnt, einzelschrägverzahnt und doppelschrägverzahnt, sowie nach der Art der Lagerung in wälz- oder gleitgelagert. Planetengetriebe werden in einem enorm großen Anwendungsbereich zur Übertragung von Drehmoment eingesetzt. Die zu übertragende Leistung variiert je nach Anwendungsgebiet von einigen Watt bis zu 100 MW, Bild 1.

Die Vorteile von Planetengetrieben gegenüber anderen Getriebebauarten zur Drehzahl- und Momentenwandlung liegen einerseits in der Möglichkeit einer Änderung des Übersetzungsverhältnisses unter Last, d.h. ohne Unterbrechung des Kraftflusses, und andererseits in ihrer kompakten Größe bei vergleichbarer Übersetzung. Zudem sind koaxiale Bauformen möglich.

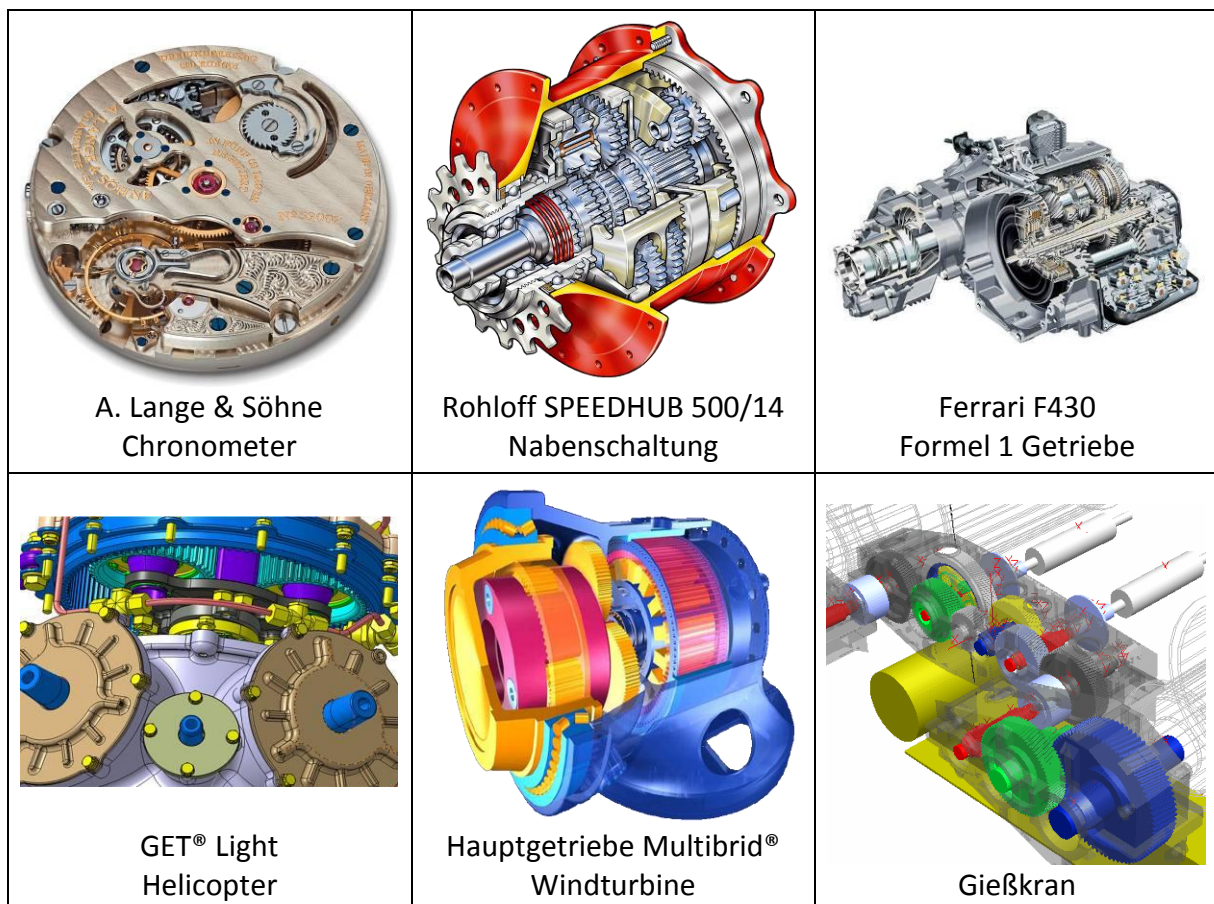


Bild 1: Anwendungsbeispiele von Planetengetrieben

2. Produktentstehungsprozess (PEP) eines Getriebes

Der Produktentwicklungsprozess (PEP) eines Getriebes erfolgt klassischer Weise beginnend von der Lastberechnung über die Getriebe- und Komponentenauslegung hin zur Strukturanalyse, Bild 2. Erst auf dem Prüfstand oder im Betrieb innerhalb des gesamten Antriebsstranges kann dann das quasistatische und dynamische Verhalten unter realen Bedingungen verifiziert werden. Diese lange Kette im PEP erlaubt keine effiziente Getriebeberechnung, vor allem unter dem Gesichtspunkt der Unsicherheiten in den Lastannahmen und damit auch zwangsläufig in den ungenauen Belastungen der einzelnen Maschinenelemente und den daraus resultierenden Beanspruchungen. [5,6]

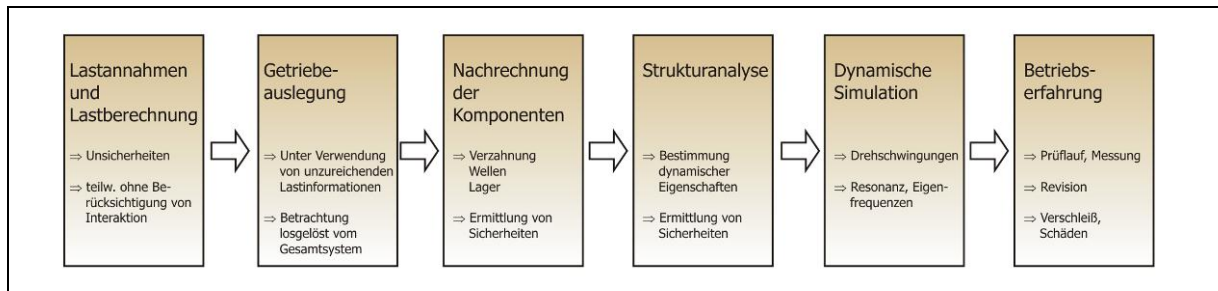


Bild 2: Klassischer Entwicklungsprozess eines Getriebes

In diesem Falle können auch die hochpräzisen und teilweise genormten Berechnungen der Maschinenelemente nur so zutreffend sein, wie es die Richtigkeit der Lastannahmen zulässt. Jegliche Interaktionen der einzelnen Elemente innerhalb des Getriebes unter Belastung (z.B. Wellendurchbiegung auf Lastverteilung der Verzahnung) gehen dabei verloren. Weiterhin muss das Getriebe – vor allem bei nichtstarrten Fundamentierungen oder dynamischen Anregungen – als Teilsystem des Antriebsstranges verstanden werden. Nur so können realitätsnahe Belastungsverläufe erstellt werden.

Es fehlt ein ausgeglichenes Berechnungsmodell für Antriebsstränge, welches alle betroffenen Teildisziplinen (Äußeren Bedingungen, Antriebstrangdynamik, Strukturmechanik, elektrische Phänomene und Anlagenregelung) in vergleichbarer Modelltiefe verbindet. Nur ein solch ausgeglichenes und alle notwendigen Randbedingungen berücksichtigendes Modell kann zuverlässige und realitätsnahe Aussagen zu den dynamischen Belastungen liefern, um eine sichere Auslegung der Antriebsstrangkomponenten zu ermöglichen.

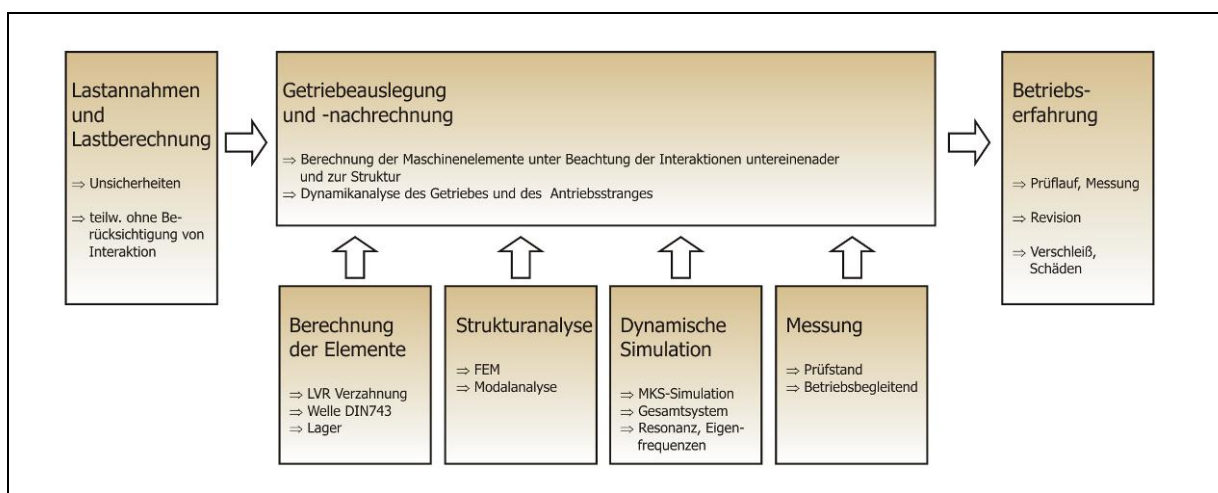


Bild 3: Entwicklungsprozess eines Getriebes als System

Die auftretenden Probleme und Schäden können nicht allein durch Analyse der einzelnen Baugruppe erklärt werden. Vielmehr müssen die notwendigen Einflüsse der umgebenden Systemkomponenten berücksichtigt und in die Berechnung einbezogen werden. Hier entsteht die eigentliche Schwierigkeit bei der Eingrenzung der notwendigen Systemparameter zur Klärung der jeweiligen Fragestellung. Dahingehend verschiebt sich der Produktentwicklungsprozess in Zukunft immer mehr zur Systemanalyse, statt der Auslegung von einzelnen Maschinenelementen. Entscheidend ist bei der Getriebeentwicklung eine durchgängige - meist softwareunterstützte - Analyse, Ergebnisaufbereitung und Datenverwaltung bis hin zur Überwachung des Lebenszyklus eines Getriebes, Bild 3.

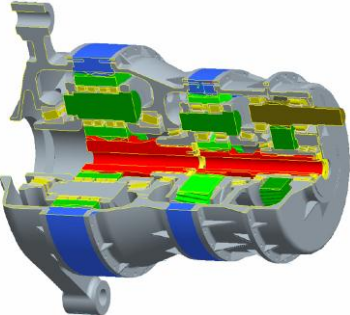

MDESIGN gearbox	MDESIGN LVR	MDESIGN LVR ^{planet}
		
<p>Getriebeberechnung nach Normen</p> <p>Verzahnungen Wellen Lager Gehäuse</p>	<p>Lastverteilungsberechnung für Stirnradgetriebe Planetenradgetriebe</p> <p>Flankenmodifikationen Leistungssteigerung Geräuschoptimierung Geometriestudien</p>	

Bild 4: Anwendungssoftware für Getriebe von DriveConcepts GmbH

3. Getriebeentwicklung nach Stand der Technik

Speziell für die Entwicklung von Planeten- und Stirnradgetrieben wurde von der Firma DriveConcepts GmbH das Produkt MDESIGN gearbox entwickelt [10,11]. Die Software ermöglicht dem Anwender eine intuitive Gestaltung des Entwicklungsprozesses vom Entwurf bis zur Nachrechnung aller Maschinenelemente eines Getriebes nach den aktuellen Normen. [1,2,3,4] . Mithilfe der Software kann das gesamte Getriebe in einem Schritt berechnet und anschließend eine komplette Dokumentation erzeugt werden (PDF/A Dokument nach ISO 19005-1:2005), Bild 5.

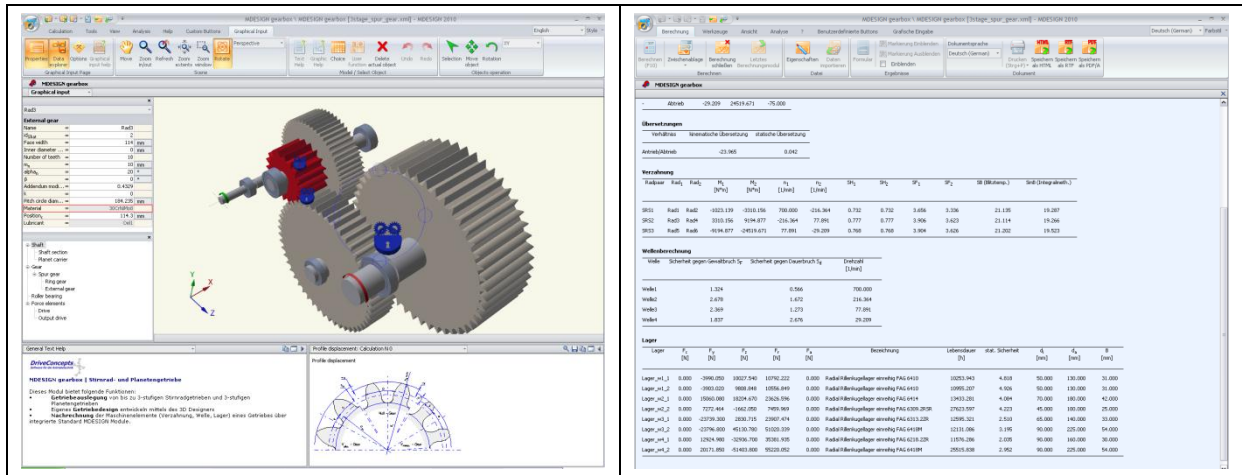


Bild 5: Oberfläche von MDESIGN gearbox mit 3D-GearDesigner® und Ergebnisseite

Einerseits sind alle notwendigen Berechnungen der Maschinenelemente: Zahnrad, Welle, Lager, Welle-Nabe-Verbindung, Schraubenverbindung, usw. entsprechend der jeweiligen Berechnungsnormen durchzuführen. Diese müssen ergänzt werden durch detaillierte Betrachtungen zur Lastverteilung, Lastaufteilung bis hin zur Optimierung einzelner Zielgrößen (Masse, Steifigkeit,...).

Diesem Ziel verpflichtet, entwickelt DriveConcepts Berechnungssoftware unter der Benutzeroberfläche MDESIGN. Diese zeichnet sich durch eine intuitive, anwenderorientierte Benutzeroberfläche, Mehrsprachigkeit, automatische Dokumentation, Datenverwaltung in Datenbanken und Transparenz der Berechnung aus. Der Einsatz der Berechnungssoftware bereits in der frühen Phase des PEP ermöglicht weit vor der Fertigung von Prototypen abgesicherte Aussagen zum fertigen Produkt. Die Berechnung kann die Messkampagnen und Prüfläufe nicht ersetzen, jedoch können unnötige Iterationsschleifen bereits im Vorfeld kostengünstig reduziert werden. /8/

Der Einsatz der Berechnungssoftware bereits in der frühen Phase des PEP ermöglicht weit vor der Fertigung von Prototypen abgesicherte Aussagen zum fertigen Produkt. Die Berechnung kann die Messkampagnen und Prüfläufe nicht ersetzen, jedoch können unnötige Iterationsschleifen bereits im Vorfeld kostengünstig reduziert werden.

4. Softwareunterstützte Getriebekonstruktion und -optimierung

Gemäß den gestiegenen Anforderungen an heutige Getriebekonstruktionen ist nicht nur eine einwandfreie Auslegung und Nachrechnung der Planetengetriebe von vordergründiger Bedeutung. Es werden der Optimierung hinsichtlich Masse und Bauraumbedarf zusehends mehr Notwendigkeit beigemessen. Daher gilt es, mit Hilfe leistungsfähiger Software dem Konstrukteur ein verlässliches Werkzeug zur Seite zu stellen. Dabei geht es zunächst um die normgerechte Berechnung der relevanten Maschinenelemente. Jedoch benötigt der Konstrukteur gleichzeitig ein Werkzeug zur innovativen Auslegung von Getrieben. Eine rechnergestützte optimierte Auslegung stellt dabei die effizienteste Vorgehensweise im Entwurfsstadium dar.

Das Ergebnisfeld einer Variantenstudie für eine fest vorgegebene Gesamtübersetzung und eine definierte Leistung ist in Bild 6 (links) wiedergegeben. Sämtliche Punkte in diesem Diagramm repräsentieren jeweils ein Getriebe als Lösungsmöglichkeit, wobei jedoch nur die untersten Punkte in diesem Diagramm Getrieben entsprechen, die die gestellten Forderungen bei minimaler Masse erfüllen. In Bild 6 (rechts) sind die jeweils masse- und bauraumoptimierten Getriebebelösungen dargestellt.

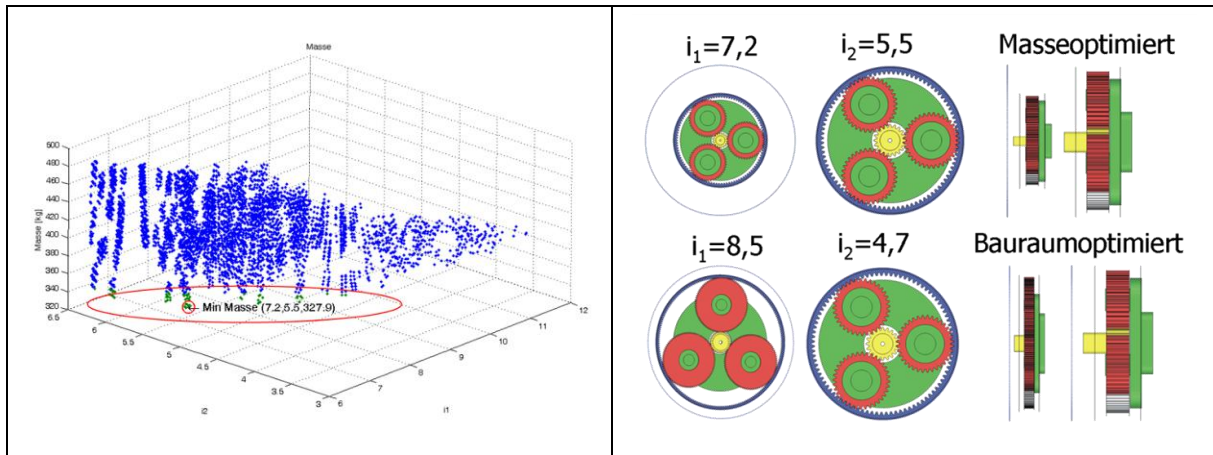
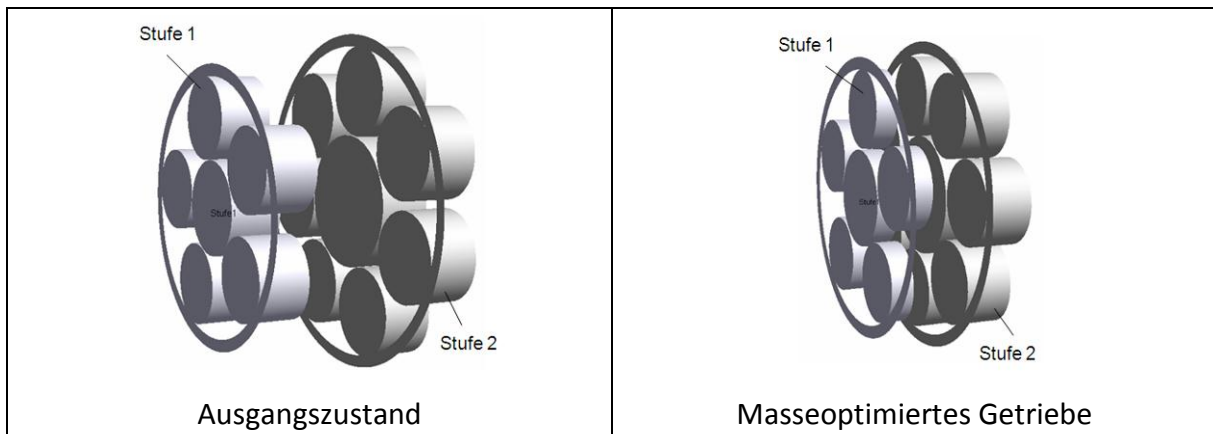


Bild 6: Optimierung der Masse und des Bauraums eines Getriebes

Gemäß Bild 7 wird bei annähernd gleich bleibenden Abmaßen des Hohlradaußendurchmesser d_3 der Stufe 2 durch Angleichung des Hohlraddurchmessers für Stufe 1 und durch die Verkleinerung der Zahnbreite eine Masseeinsparung erreicht. Unter Berücksichtigung entsprechend vorgegebener Sicherheitsfaktoren im Berechnungsprogramm MDESIGN gearbox wird von vorneherein eine Überdimensionierung des Planetengetriebes vermieden. Die Masse des Originals beträgt $m_{ges} \approx 2200$ kg. Alle generierten, optimierten Lösungen erreichen eine Massereduzierung im Vergleich zum realen Getriebe. Die masseoptimierte Vorzugsvariante ist in Bild 7 (rechts) dargestellt.



Auslegung & Optimierung von mehrstufigen Getrieben

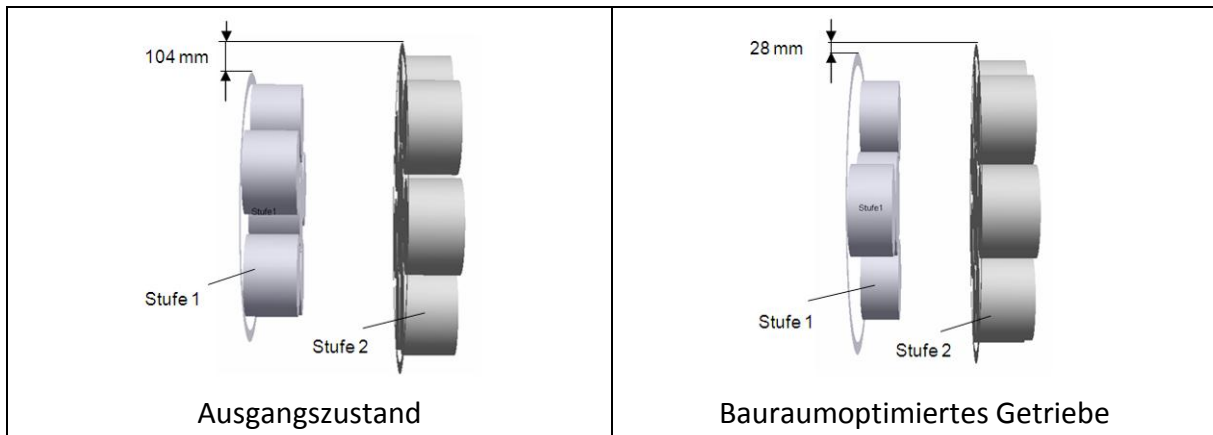


Bild 7: Variantenstudie Masse- & Bauraumoptimierung

Die Masseersparnis beträgt in diesem Beispiel rund 25 % bezogen auf den Originalentwurf. Gleichzeitig beträgt die Optimierung des Bauraums 15 %.

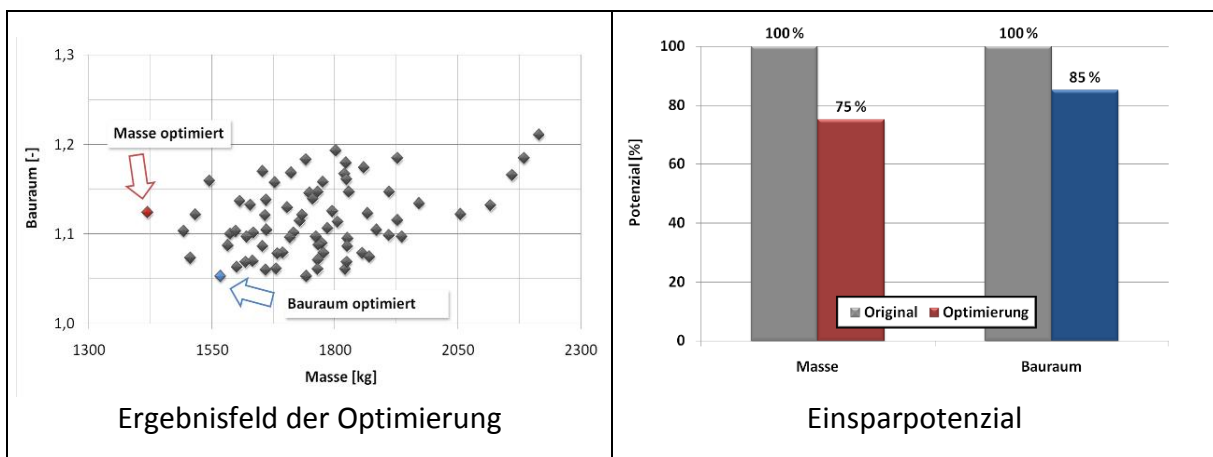


Bild 8: Oberfläche von MDESIGN® gearbox mit 3D-GearDesigner® und Ergebnisseite

Die Betrachtungen können sowohl zur Verbesserung bestehender Getriebeentwürfe, als auch zur Neuauslegung herangezogen werden. Am aufgeführten Beispiel eines existierenden Getriebeentwurfes ist zu sehen wie hoch das Potenzial sein kann. Softwarelösungen wie MDESIGN gearbox leisten hier einen wesentlichen Beitrag zum ressourcenschonenden Einsatz von Material bei gleichzeitiger Absicherung ausreichender Sicherheiten im Getriebe.

Anschließend ermöglicht der fertige Getriebeentwurf vielfältige Optimierungsmöglichkeiten der Makrogeometrie sowie der Mikrogeometrie. Die Festlegung der Verzahnungsmodifikationen unter Berücksichtigung der Getriebeelastizitäten sowie die teilautomatische Berechnung der Gehäusesteifigkeiten [12] stellen das Spektrum der Möglichkeiten der Software MDESIGN gearbox sowie MDESIGN LVR und MDESIGN LVR^{planet} dar. Während der Konstrukteur ein Werkzeug zur innovativen Auslegung von Getrieben benötigt, der Berechnungsexperte hingegen möchte daraufhin die Modifikationen der Zahnflanken unter Beachtung aller notwendigen Getriebeelastizitäten auslegen. Und zuletzt soll der Entwurf einer tiefgründigen Optimierungsprozedur unterzogen werden. Alle zusammen vereint der Wunsch nach einer durchgängigen Dokumentation. Resultate einer solchen Entwicklung zeigt Bild 11.

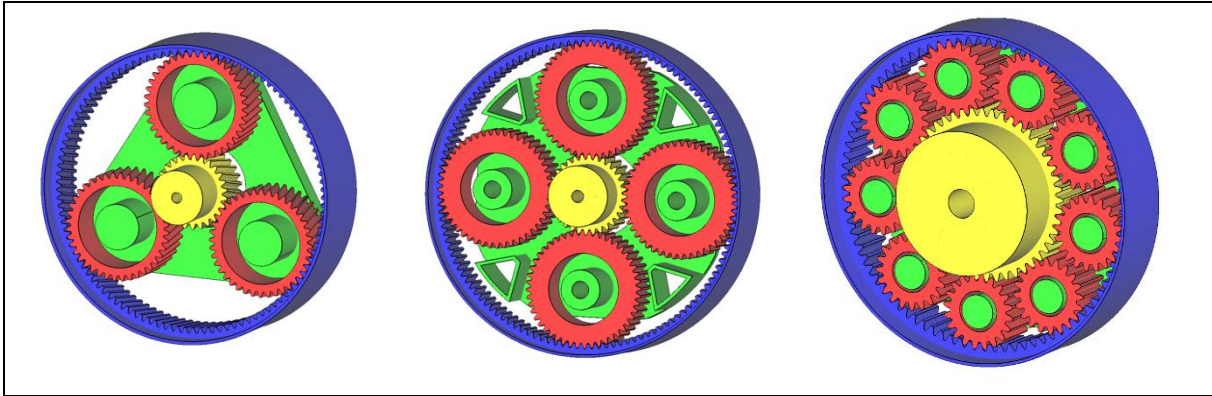


Bild 9: Variantenstudien Planetenradgetriebe

5. Normberechnung zur Flankentragfähigkeit

Ausgangspunkt der Untersuchung der Verzahnung ist die Auslegung bzw. Nachrechnung nach ISO 6336:2008. Dabei wird das Augenmerk auf die Flankenpressung gelegt. Die Berechnung der maximalen Flankenpressung erfolgt bei Geradverzahnung im äußeren Einzeleingriffspunkt B und berechnet sich aus der nominellen Flankenpressung σ_{H0} und verschiedenen Einflussfaktoren sowie dem Einzeleingriffsfaktor $Z_{B,D}$. Häufiges Problem in der Normberechnung - insbesondere bei Planetenradgetrieben - ist die Berechnung der Einflussfaktoren (K_v , $K_{H\alpha}$, $K_{H\beta}$, K_γ), die nur durch genaue Messungen oder umfassende mathematische Analyse ausreichend genau bestimmt werden können. Die Methode A der ISO 6336 (früher: DIN 3990) lässt diese detaillierte Berechnung, wie sie mit der Software MDESIGN LVR^{planet} durchgeführt werden kann, zu. Durch Optimierung dieser Einflussfaktoren kann bei bestehenden Getrieben eine Leistungssteigerung erreicht werden sowie neue Konstruktionen deutlich effizienter ausgelegt werden.

Im ersten Schritt der Auslegung einer Verzahnung nach Norm wird ein Breitenlastverteilungsfaktor $K_{H\beta} = 1,2$ angenommen. Die weiteren Lastüberhöhungsfaktoren werden mit Eins vorgegeben. Eine Nachrechnung mit der entsprechenden Software muss dann die getroffenen Annahmen bestätigen oder verbessern. Dies ist gängige Praxis im Getriebeentwicklungsprozess eines Planetengetriebes.

$$\sigma_{H \max} = Z_{B/D} \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha} \cdot K_\gamma} \quad (1)$$

- K_A - Anwendungsfaktor
- K_V - Dynamikfaktor
- $K_{H\beta}$ - Breitenlastverteilungsfaktor
- $K_{H\alpha}$ - Stirnlastverteilungsfaktor
- K_γ - Lastaufteilungsfaktor

Ziel der Berechnung mit MDESIGN LVR^{planet} ist es nun, durch die detaillierte Analyse der Beanspruchungsverhältnisse, die Angaben zu den Einflussfaktoren zu überprüfen, mögliches Optimierungspotenzial hinsichtlich der Tragfähigkeit auszuschöpfen und dabei eine Neuauslegung der Verzahnung zu vermeiden.

6. Literatur

- [1] Börner, J., Senf, M., Linke, H.: Beanspruchungsanalyse bei Stirnradgetrieben – Nutzung der Berechnungssoftware LVR; Vortrag DMK 2003, Dresden, 23. und 24. September 2003
- [2] Baumann, F, Trempler U.: Analyse zur Beanspruchung der Verzahnung von Planetengetrieben, Vortrag DMK 2007, Dresden
- [3] Börner, J.: Modellreduktion für Antriebssysteme mit Zahnradgetrieben zur vereinfachten Berechnung der inneren dynamischen Zahnkräfte. Dissertation TU Dresden, 1988
- [4] Börner, J.; Senf, M.: Verzahnungsbeanspruchung im Eingriffsfeld – effektiv berechnet. Antriebstechnik 34, 1995, 1
- [5] Börner, J.: Genauere Analyse der Beanspruchung von Verzahnungen. Beitrag zur Tagung „Antriebstechnik, Zahnradgetriebe“, Dresden, 09/2000
- [6] Bulligk, Chr.: Theoretische Untersuchung zur modularisierten Berechnung und Auslegung von Getrieben, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH, 2009
- [7] CalculiX: freies FEM Programm , MTU Aero-ingenier-GmbH, (www.calculix.de);
- [8] Gajewski, G.: Untersuchungen zum Einfluss der Breitenballigkeit auf die Tragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Dissertation TU Dresden, 1984
- [9] Gajewski, G.: Ermittlung der allgemeinen Einflussfunktion für die Berechnung der Lastverteilung bei Stirnrädern. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Grundlagen des Maschinenwesens, 1984
- [10] Hartmann-Gerlach, Christian: Erstellung eines Berechnungskerns für die Software MDESIGN LVR^{planet}. Unveröffentlichte interne Arbeit, DriveConcepts GmbH 2007
- [11] Hartmann-Gerlach, Christian: Verformungsanalyse von Planetenträgern unter Verwendung der Finiten Elemente Methode. Unveröffentlichte interne Arbeit, DriveConcepts GmbH 2008
- [12] Hartmann-Gerlach, Christian: Effiziente Getrieberechnung von der Auslegung bis zur Nachrechnung mit MDESIGN gearbox und MDESIGN LVR^{planet}, Vortrag anlässlich des SIMPEP Kongresses in Würzburg, 18.-19. Juni 2009
- [13] Heß, R.: Untersuchungen zum Einfluss der Wellen und Lager sowie der Lagerluft auf die Breitenlastverteilung von Stirnradverzahnungen. Diss. TU Dresden, 1987
- [14] Hohrein, A.; Senf, M.: Reibungs-, Schmierungs-, Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an Zahnradgetrieben. Forschungsbericht TU Dresden, 1977
- [15] Hohrein, A.; Senf, M.: Untersuchungen zur Last- und Spannungsverteilung an schrägverzahnnten Stirnrädern. Diss. TU Dresden, 1978
- [16] Linke, H.: Untersuchungen zur Ermittlung dynamischer Zahnkräfte. Diss. TU Dresden, 1969
- [17] Linke, H.: Stirnradverzahnung – Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. München, Wien : Hanser, 1996

- [18] Linke, H.; Mitschke, W.; Senf, M.: Einfluss der Radkörpergestaltung auf die Tragfähigkeit von Stirnradverzahnungen. In: Maschinenbautechnik 32 (1983) 10, S 450-456
- [19] Neugebauer, G.: Beitrag zur Ermittlung der Lastverteilung über die Zahnbreite bei schrägverzahnten Stirnrädern. Dissertation TU Dresden, 1962
- [20] Oehme, J.: Beitrag zur Lastverteilung schrägverzahnter Stirnräder auf der Grundlage experimenteller Zahnverformungsuntersuchungen. Diss. Technische Universität Dresden. 1975
- [21] Polyakov, D.: Entwicklung eines durchgängigen Rechenmodells zur Bestimmung der Gehäusesteifigkeit unter Verwendung der FE Methode, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH
- [22] Schlecht, B., Hantschack, F., Schulze, T.: Einfluss der Bohrungen im Kranz auf die Tragfähigkeit von Hohlradverzahnungen; Antriebstechnik 41 (2002), Teil I, Heft 12, S. 45-47; Antriebstechnik 42 (2003), Teil II, Heft 2, S. 51-55
- [23] Schlecht, B. Senf, M.; Schulze, T.: Beanspruchungsanalyse bei Stirnradgetrieben und Planetengetrieben - Haus der Technik e.V., Essen, 09./10. März 2010
- [24] Schlecht, B.; Schulze, T.; Hartmann-Gerlach, C.: Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse - Zeitschriftenbeitrag Konstruktion 06/2009 S12.ff, DriveConcepts GmbH, 2009
- [25] Schulze, Tobias: Getriebeberechnung nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, Vortrag anlässlich des Dresdner Maschinenelemente DMK2007 in Dresden, DriveConcepts GmbH, 2007
- [26] Schulze, Tobias: Load Distribution in planetary gears under consideration of all relevant influences, Vortrag anlässlich JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, Sendai (Japan), 13.-15. Mai 2009
- [27] Schulze, Tobias: Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse, Vortrag auf KT2009 in Bayreuth zur Lastverteilung in Planetengetrieben, 08.-09.10.2009
- [28] Schulze, Tobias: Ganzheitliche dynamische Antriebsstrangsbetrachtung von Windenergieanlagen. Sierke Verlag 2008, Dissertation TU Dresden
- [29] Schulze, Tobias: Load distribution in planetary gears. Danish gear society "Gearteknisk InteresseGruppe", 11th february 2010 at SDU in Odense, Denmark
- [30] Schulze, Tobias: Calculation of load distribution in planetary gears for an effective gear design process. AGMA Fall Technical Meeting 2010, October 17-19, 2010, Milwaukee Wis, USA

Normen | Standards

- [31] DIN 867:1986 – Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern (Zylinderrädern) für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau.
- [32] DIN 3960:1987 – Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderpaare) mit Evolventenverzahnung.

- [33] Beiblatt 1 zu DIN 3960:1980 – Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderpaare) mit Evolventenverzahnung; Zusammenstellung der Gleichungen
- [34] DIN 3990:1987, Teil 1 - 5 Tragfähigkeit von Stirnrädern.
- [35] DIN 743:2008 T1-T4 & Beiblatt 1,2 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [36] DIN ISO 281:2009 Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer - Berechnung der modifizierten nominellen Referenz-Lebensdauer für Wälzlager
- [37] ISO 6336:2008 Calculation of load capacity of spur and helical gears
- [38] VDI 2737:2005, Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit von Innenverzahnungen mit Zahnkranzeinfluss, VDI-Richtlinie

Software

- [39] MDESIGN[®] LVR 2010, software for load distribution of multi stage spur- and helical gears. DriveConcepts GmbH, 2010
- [40] MDESIGN[®] LVR^{planet} 2010, software for load distribution of planetary gear stages. DriveConcepts GmbH, 2010
- [41] MDESIGN[®] gearbox 2010, design and calculation software for multi stage gearboxes. DriveConcepts GmbH, 2010