

Rechnerische Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung realer Belastungskollektive für die Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes

Dr.-Ing. T.Körner, Dipl.-Ing. H.Depping, Voith Turbo GmbH, Heidenheim

Dipl.-Ing.(FH) J.Häckh, Prof. Dr.-Ing. G. Willmerding, Steinbeis TZ Neue Technologien in der Verkehrstechnik, Ulm

Dipl.-Ing. W. Klos, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau, Stuttgart

1. Einführung

Die Entwicklung der Antriebsstränge in Nutzfahrzeugen ist seit Jahren dadurch gekennzeichnet, dass die Eingangsdrehmomente für die Stufengetriebe dieser Antriebe stetig wachsen. Von dieser Tendenz sind immer gleichzeitig auch Omnibusantriebsstränge betroffen, nicht nur aus dem Zusammenhang heraus, dass die Omnibusmotoren aus den LKW-Motoren abgeleitet werden. Die höheren Drehmoment-Anforderungen haben das Ziel, ein möglichst hohes Geschwindigkeitsprofil über die schnell zu befahrenden Zubringerstrecken zu erreichen und dabei die Abgasemissionen, die Geräuschentwicklung und den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Stufengetriebe müssen dieser Entwicklung durch ständige Anpassung Rechnung tragen. Die erforderliche Lebensdauer und Zuverlässigkeit muss gewährleistet sein. Dabei müssen verschiedenste Bauteile im Getriebe wie Zahnräder, Lager, Wellen usw. berücksichtigt werden, deren Belastungskollektive sich mit einer Drehmomentsteigerung unterschiedlich ändern.

Am Beispiel einer Hauptwelle für ein Nutzfahrzeuggetriebe soll aufgezeigt werden, wie mit leistungsfähigen Entwicklungswerkzeugen der Lebensdauernachweis für verschiedenste Bauteile im Getriebe erbracht werden kann.

2. Ermittlung realer Belastungskollektive

Bei Linienbussen wird der gleiche Getriebetyp in unterschiedlichsten Fahrzeugen auf verschiedensten Strecken eingesetzt. Dies führt zu einem großen Spektrum an Belastungskollektiven für die Bauteile. Neben der Drehmomentenkapazität des Motors ist für

die Belastung der Getriebebauteile das Fahrzeuggewicht, die Achsübersetzung, das Schaltprogramm, die Topografie der Strecke und das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs von entscheidender Bedeutung.

Es ist praktisch unmöglich für alle Bauteile Belastungskollektive messtechnisch zu ermitteln, Voith hat deshalb schon seit vielen Jahren ein Messsystem im Einsatz, das die Topografie der Fahrstrecke und die Geschwindigkeitsverläufe für eine große Anzahl von realen Kundeneinsätzen ermittelt.

Diese Daten werden mit einem einfach einsetzbaren GPS-basierenden System (DIANA) erfasst und für anschließende Simulationen des Antriebsstrangs wieder verwendet (winEVA). Um Simulation und Wirklichkeit zu überprüfen, werden auch kurze Fahrzyklen mit hoher Abtastrate gemessen, wobei sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung zeigt. Die Simulationsergebnisse des Antriebsstrangs werden durch Datenübergabe an winLIFE für Lebensdauervorhersagen verwendet (Bild 1).

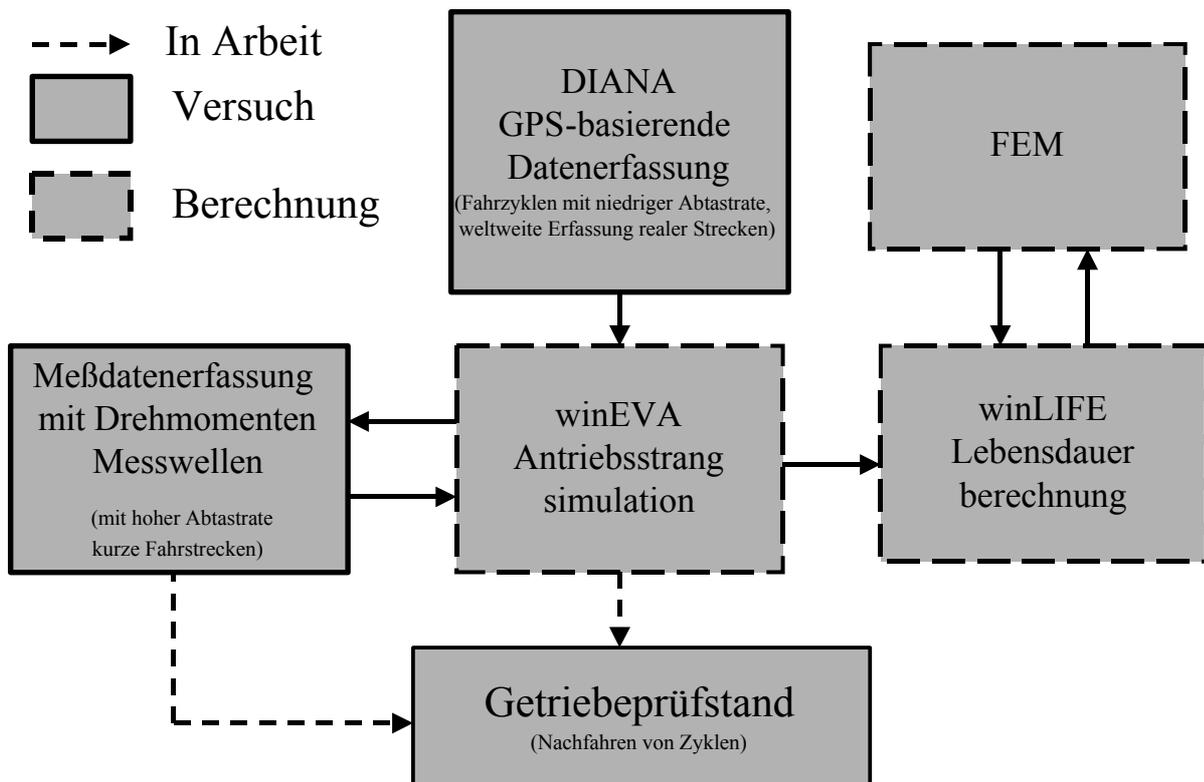


Bild 1: Zusammenwirken der Entwicklungswerkzeuge zur Antriebsstrangsimulation und Lebensdauervorhersage im Hause Voith

3. Ermittlung der Belastung im Getriebe durch Simulation

Das Simulationsmodell (Bild 2) ermöglicht eine sehr wirklichkeitsnahe Abbildung des Antriebsstrangs, dessen Grad an Detailliertheit aus Gründen der Rechenzeit den Fragestellungen angepasst werden kann.

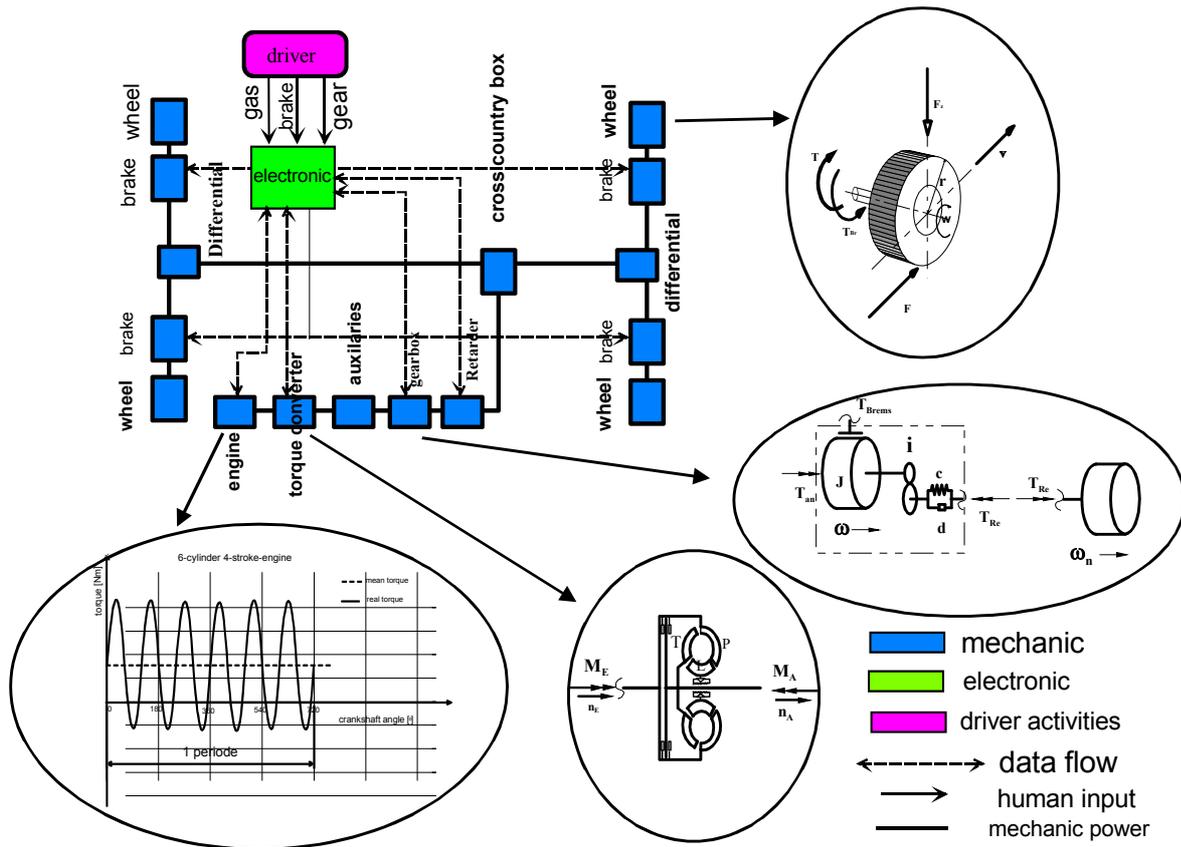


Bild 2: Struktur des Modells zur Antriebsstrangsimulation

Da der Schaltvorgang von großem Einfluss auf die Belastung ist, muss auch die Steuerung des Getriebes, die die Bedingungen des Schaltvorgangs festlegt, modelliert werden. Drehschwingungen können durch den in Bild 3 dargestellten Mehrmassenschwinger ausreichend abgebildet werden. Da die Voith-Getriebe mit einem Drehschwingungsdämpfer (HTSD) am Eingang ausgestattet sind, kann das Drehkraftverhalten des Motors bedingt durch die Zündvorgänge meist vernachlässigt werden und es wird mit einem mittleren Drehmoment pro Motorumdrehung gerechnet.

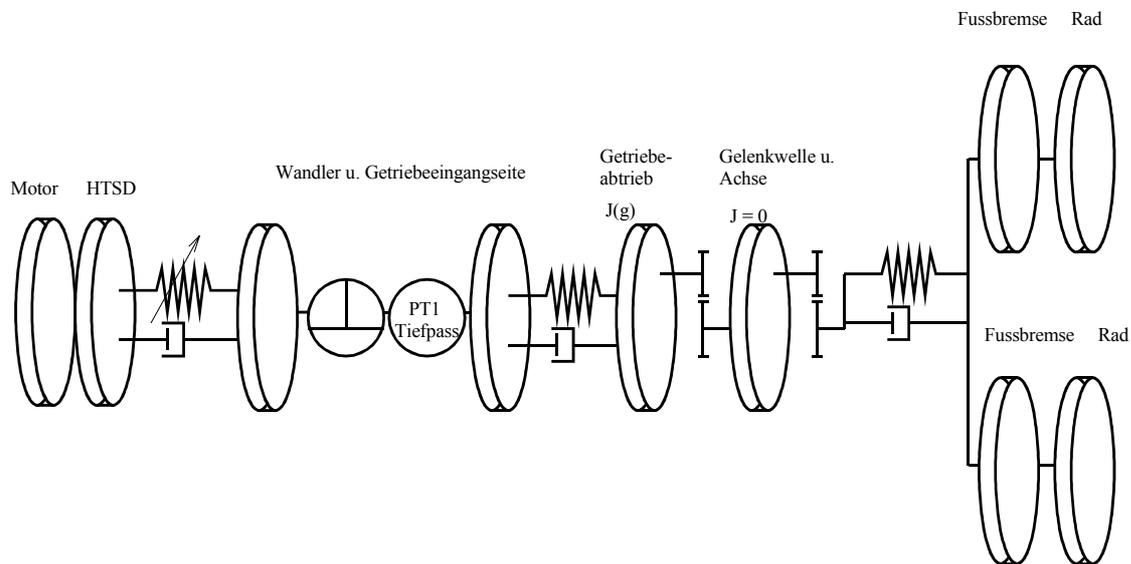


Bild 3: Modell zur Berücksichtigung der Drehmassen im Antriebsstrangs

Berechnet man nun Fahrzyklen von Nutzfahrzeuggetrieben, so erhält man aus der Simulation den Verlauf des Drehmomentes, das die Getriebewelle überträgt. Dieser Drehmomentenverlauf als Funktion der Zeit wird als Basis für die Lebensdauerberechnung verwendet.

Einen typischen Verlauf des Drehmomentes aus einem Stadtbuszyklus zeigt Bild 4. Man erkennt sehr deutlich die unterschiedliche Höhe der Drehmomente beim Anfahren, Schalten, bei der Konstantfahrt und schließlich beim Anbremsen an die nächste Haltestelle. Die Getriebe werden im Stadt- oder Zubringerverkehr sowie in Flughafen- oder Reisebussen eingesetzt.

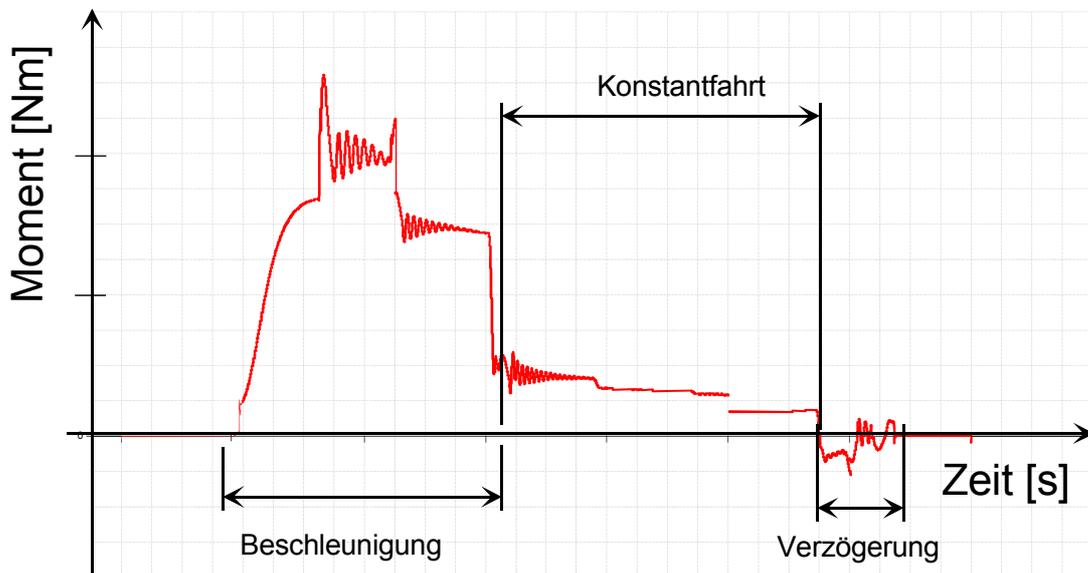


Bild 4: Drehmomentenverlauf in der Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes bei einem Stadtbuszyklus (ca. 350 m)

Der zeitliche Verlauf des Drehmomentes wird nach dem Rainflow-Verfahren klassiert, aus dessen Matrix sich weitere Klassierverfahren ableiten lassen. Für die Hauptwelle des Nutzfahrzeuggetriebes wird das Bereichspaar-Mittelwert-Kollektiv als Darstellungsart verwendet. Es hat den Vorteil, dass es den Zusammenhang zwischen der Bauteilschädigung, Mittelspannung und Spannungsamplitude übersichtlich darstellt.

Bild 5 zeigt das Bereichspaar Mittelwert Kollektiv für die Hauptwelle als Ergebnis einer Simulation für einen Stadtzyklus und einer Schadensakkumulationsrechnung. Die Spannungsamplituden sind hier zur übersichtlicheren Darstellung nach Höhe der Mittelspannung sortiert.

Die größte Schädigung resultiert aus der Schwingweite, die sich aus dem maximalen Anfahrmoment und dem beim Bremsen resultierenden Bremsmoment ergibt. Sie ist in Bild 5 gekennzeichnet.

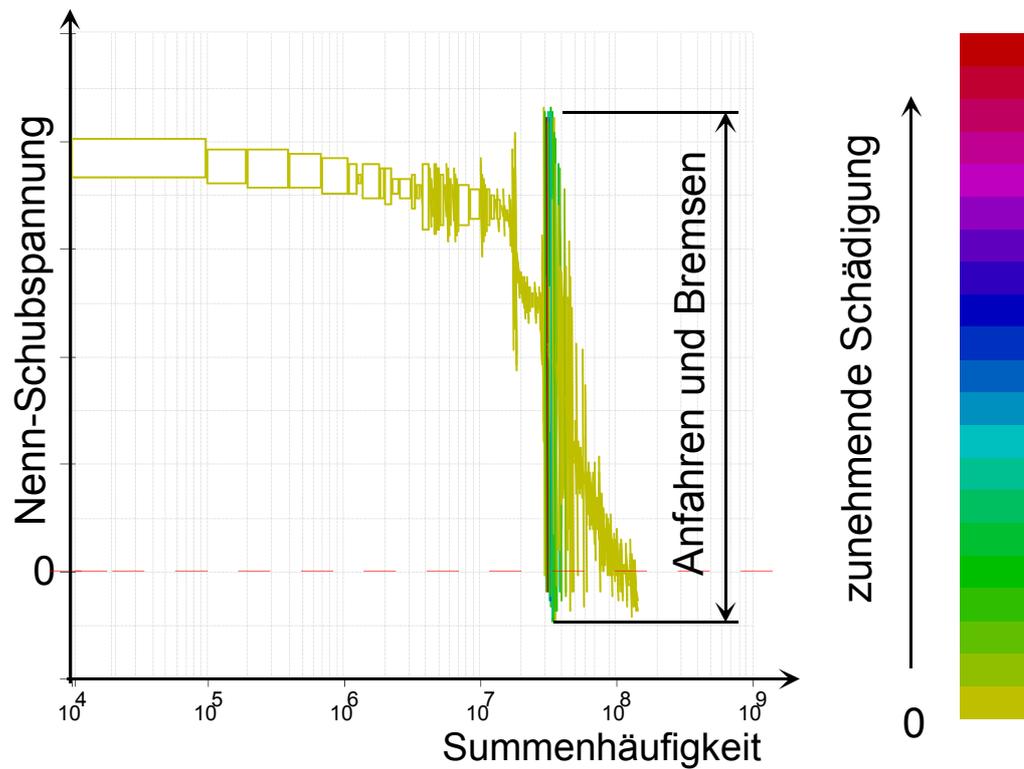


Bild 5: Bereichsmittelpaarzählung der Spannung der Getriebewelle

4. Wöhlerlinie der Hauptwelle

Die evolventenverzahnte Hauptwelle eines Stufengetriebes soll für eine neue Motorgeneration hinsichtlich Lebensdauer untersucht werden. Die Werkstoffe 16MnCr5 und 17CrNiMo6 stehen als Alternativen zur Diskussion. Die Wöhlerlinie muss rechnerisch abgeschätzt werden.

Für eine nach DIN 5480 evolventenverzahnte Welle ist die Wöhlerlinie durch Messungen bekannt. Der kritische Bereich liegt im Auslauf der Verzahnung, Bild 6.

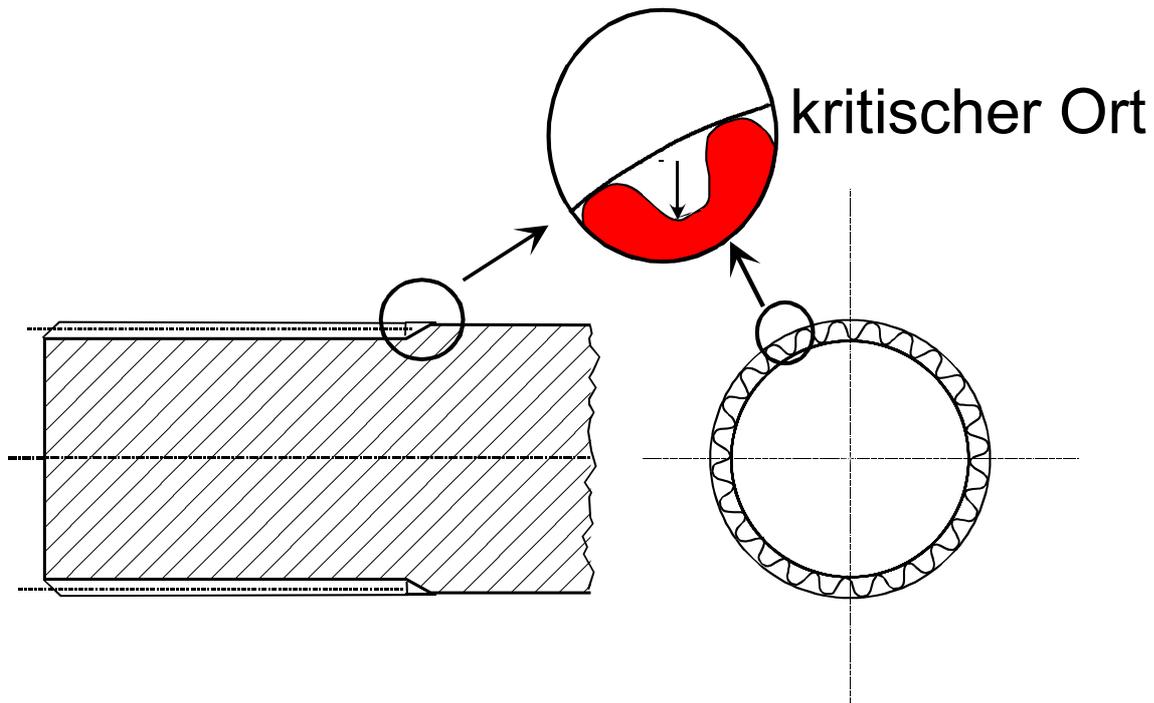


Bild 6: Welle des Getriebes mit Evolventenverzahnung nach DIN 5480

Nach der FKM Richtlinie [3] wurde die Bauteilwöhlerlinie abgeschätzt und die Ergebnisse den Messergebnissen dadurch angepasst (Bild 7), indem der Randschichtfaktor K_v so gewählt wurde, dass sich gleiche Dauerfestigkeiten ergeben. Durch K_v wird einer Dauerfestigkeitssteigerung durch die Einsatzhärtung Rechnung getragen und der unbekannte Faktor, der nach FKM zwischen 1,2 und 2 liegen kann, wurde so bestimmt.

Mit dem angepassten Berechnungsansatz für die Dauerfestigkeit und der versuchstechnisch ermittelten Ecklastspielzahl und der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden, wird mit guter Näherung eine synthetische Wöhlerlinie für die Hauptwelle ermittelt.

Quelle	Ecklastspielzahl N_D	Dauerfestigkeit S_D	Neigung k	Mittelspannungs empfindlichkeit M	Bemerkungen
FKM [3]	10^6	200	(8 n. FKM) verwendet 4,63	0,17	Einsatzhärten durch $K_v = 1,28$ berücksichtigt
Versuch	10^6	200	4,63	0,17 angenommen	

Bild 7: Bauteilwöhlerlinie einer evolventenverzahnten Welle für den Werkstoff 17CrNiMo6 für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% (einsatzgehärtet)

5. Berechnung der Lebensdauer für die Hauptwelle

Auf 3 charakteristischen Strecken wurden Simulationen für einen bestehenden Motor und für eine neue Motorgeneration mit einem um 300 Nm erhöhten Drehmoment durchgeführt. Das Fahrzeuggewicht, die Achsübersetzung und das Schaltprogramm wurden so parametrisiert, dass an der Hauptwelle zwar maximale aber noch praxisgerechte Belastungen auftreten.

Linie 15 in Heidenheim repräsentiert einen Stadtzyklus mit hoher Haltestellenanzahl

Linie 41 in Heidenheim einen Zubringerzyklus mit weniger Haltestellen

Strecke Lyon - Barcelona eine Autobahnfahrt mit großen Zeitanteilen hoher

Fahrgeschwindigkeit

Die Ergebnisse der Lastkollektivsimulation für die Hauptwelle sind zusammen mit den nach [3] berechneten, synthetischen Wöhlerlinien in Bild 8 und Bild 9 dargestellt. Die Belastungsamplituden sind wegen der einfacheren Darstellung ohne Mittelspannung aufgetragen und das Belastungskollektiv zur übersichtlicheren Darstellung auf 1 Mio. km extrapoliert.

Es ist erkennbar, dass die unterschiedlichen Strecken auch zu deutlich unterschiedlichen Beanspruchungskollektiven führen. Während die maximalen Drehmomente annähernd gleiches Niveau aufweisen, differiert die Lastwechselzahl der schädigungsrelevanten Amplituden um mehrere Zehnerpotenzen. Nicht dargestellte Analysemöglichkeiten der Programme zeigen, dass hierfür letztlich die Anzahl der Halts und damit die Anzahl der Anfahrvorgänge verantwortlich sind.

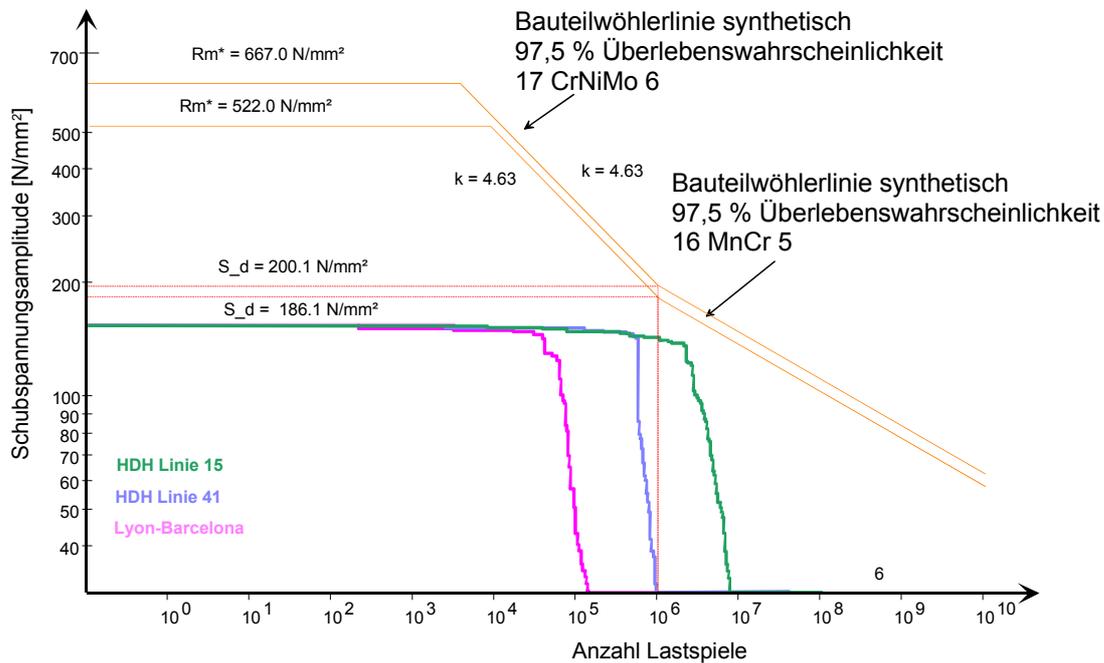


Bild 8: Wöhlerlinie und Belastungskollektive für 1 Mio km, verschiedene Strecken und für die Werkstoffe 16MnCr 5 und 17CrNiMo6

Beim aktuellen Drehmomentenniveau des Motors liegt auch beim schwächeren Werkstoff 16MnCr5 die Beanspruchung deutlich unterhalb der Dauerfestigkeit. Ein um 300 Nm erhöhtes Drehmoment führt, unter Berücksichtigung der hier nicht dargestellten Mittelspannung, zu einer Überschreitung der Dauerfestigkeit (Bild 9). Die gewünschte Lebensdauer von 10^6 km wird auf der Strecke HDH Linie 15 auch mit dem höherwertigen Werkstoff nicht erreicht.

Die nach der Schadensakkumulationshypothese Miner Haibach berechneten Lebensdauer- bzw. Fahrleistungsunterschiede für verschiedene Strecken und Drehmomente zeigt Bild 10.

Es wird deutlich, dass mit einem Werkstoff 16MnCr5 und dem aktuellen Drehmomentenniveau die gewünschte Fahrstrecke von 1 Mio. km auf allen Strecken annähernd erreicht wird. Ein erhöhtes Drehmoment von 300 Nm wird jedoch auch bei Verwendung des höherwertigen Werkstoffes 17CrNiMo6 auf der Strecke HDH Linie 15 deutlich verfehlt, so dass konstruktive oder steuerungstechnische Maßnahmen erforderlich sind.

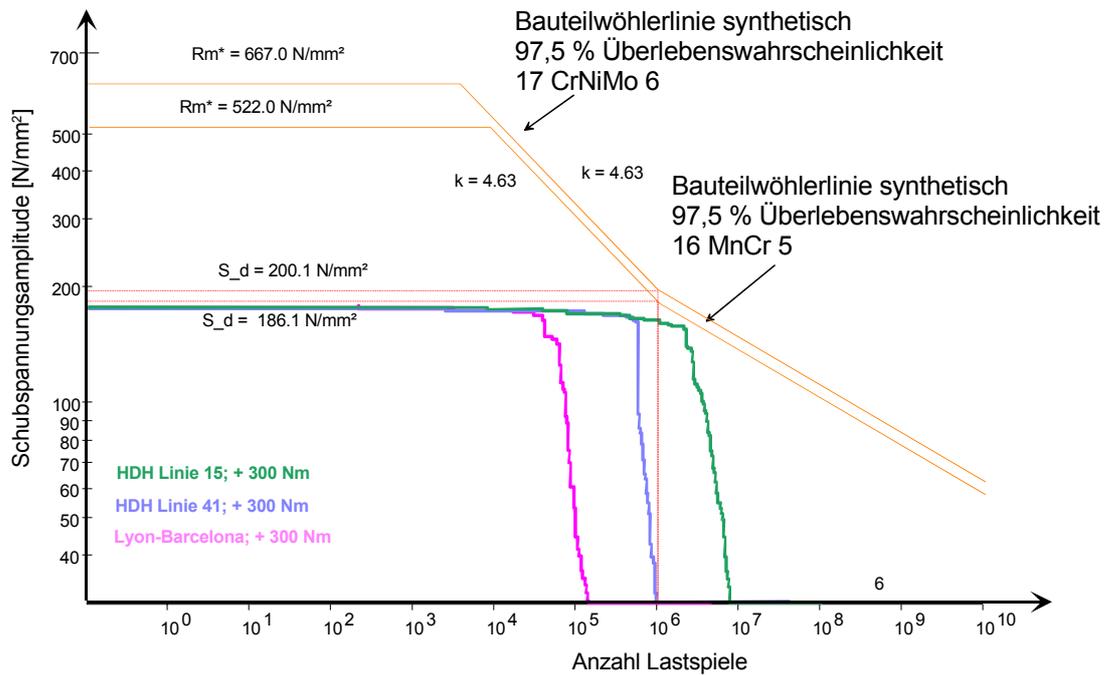


Bild 9: Wöhlerlinie und Belastungskollektive für 1 Mio km, verschiedene Strecken, ein um 300 Nm erhöhtes Drehmoment und für die Werkstoffe 16MnCr 5 und 17CrNiMo6

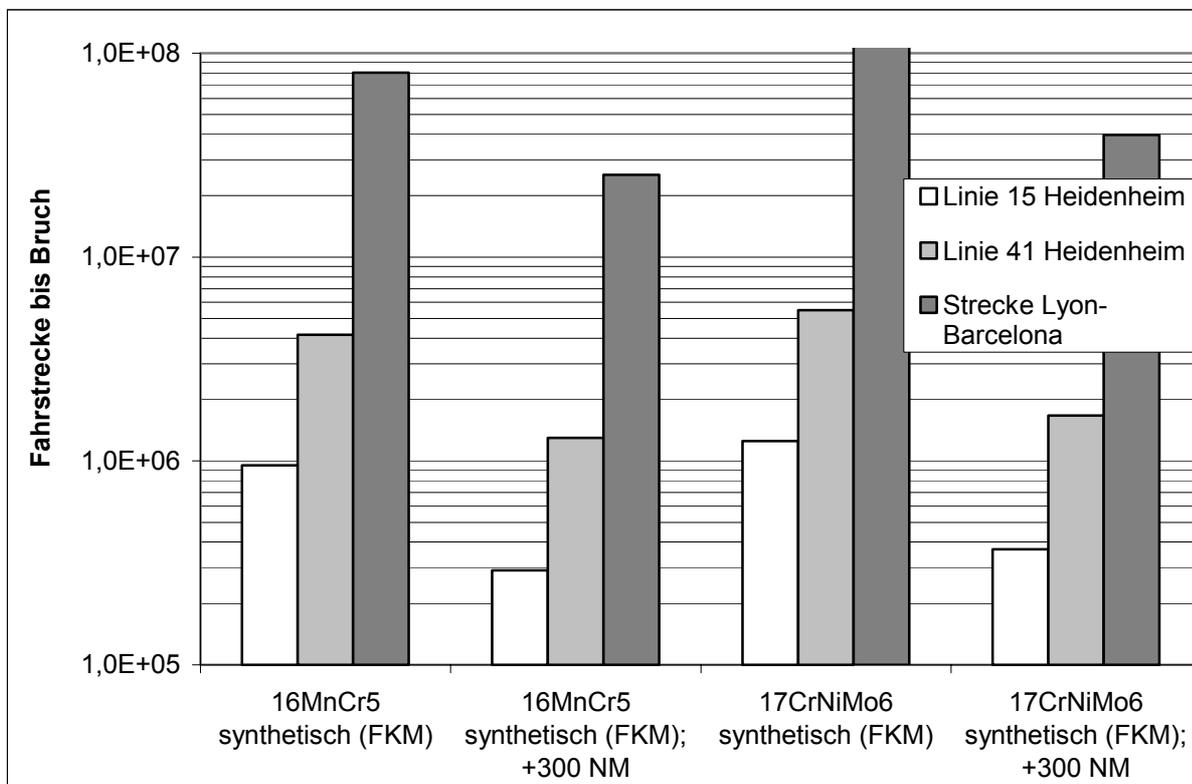


Bild 10: Ergebnisse der rechnerischen Vorhersage der Lebensdauer bei 2,5% Ausfallwahrscheinlichkeit für die Strecken Linie 41 und Linie 15 in Heidenheim und Lyon-Barcelona

6. Zusammenfassung

Neben der Forderung nach höheren Motordrehmomenten für Nutzfahrzeuge erfordert auch der ständige Zwang zur Kosten- und Gewichtsoptimierung leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge für den Lebensdauernachweis der beteiligten Antriebsstrangkomponenten.

Am Beispiel der Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes für Linienbusse wurde aufgezeigt, wie durch Messung von charakteristischen Strecken- und Geschwindigkeitsprofilen, in Verbindung mit Simulationsprogrammen für Lastkollektive und Lebensdauer, verschiedenste Parameter in ihrer Wirkung auf die Lebensdauer untersucht werden können.

Die aus Messungen bekannte Wöhlerlinie für eine evolventenverzahnte Welle konnte nach FKM Richtlinien plausibel nachvollzogen werden. Für verschiedene Konstruktionsvarianten kann somit eine synthetische Wöhlerlinie generiert und zusammen mit den Simulationsprogrammen eine Lebensdauerabschätzung in kürzester Zeit und mit geringen Kosten ermöglicht werden.

Die prüfstandsgestützte Verifikation von Lebensdauer und Zuverlässigkeit ist durch eine rechnerische Lebensdauerabschätzung nicht zu ersetzen. Sie ist aber, wie hier aufgezeigt wurde, als unterstützendes Werkzeug unentbehrlich. Insbesondere können dadurch Versuche gezielter durchgeführt werden.

7. Literaturverzeichnis

[1] Dietz, Peter: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Selbstverlag des Autors, Dr. P. Dietz, Platanenstr. 11, 6087 Büttelborn

[2] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit-Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI-Verlag 1989

[3] FKM Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe 1998, Forschungskuratorium Maschinenbau, 1998

[4] Issler, L., Ruoff, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre Grundlagen, Springer-Verlag Berlin 1995, ISBN 3-540-57995-8

[5] Häckh, J; Willmerding, G; Kley, M; Binz, H; Körner, T: Rechnerische Lebensdauerabschätzung von Getriebegehäusen unter Einbeziehung realer multiaxialer Belastungen, DVM-Tagung Fulda 2002