

Rechnerische Lebensdauerabschätzung von Getriebegehäusen unter Einbeziehung realer multiaxialer Belastungen

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

Dipl.-Ing. M. Kley, Prof. Dr.-Ing. H. Binz, IMK, Universität Stuttgart
Dr.-Ing. T. Körner, Voith Turbo, Heidenheim

1. Einführung

Moderne Stadtbusse werden üblicherweise mit Automatgetrieben ausgestattet. Während einerseits kompaktere, leichtere und leistungsfähigere Getriebe gefordert werden, soll andererseits der Einsatzbereich der Getriebe erweitert werden. Aufgrund der daraus resultierenden größeren Vielfalt an Fahrzeugen, Motoren, Fahrzyklen und Antriebskonzepten unterliegen die Getriebegehäuse unterschiedlichsten Betriebsbeanspruchungen, die sich auf die Betriebsfestigkeit der Gehäuse auswirken.

Stadtbusse weisen im Gegensatz zu anderen Fahrzeugarten einen speziellen Fahrzyklus auf, der durch häufige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge pro Kilometer (3 – 4 Stopps pro km) gekennzeichnet ist [1]. Zur Entlastung der Fahrer werden deshalb Automatgetriebe eingesetzt. Der erweiterte Einsatzbereich neuer Getriebe in Verbindung mit der Reduzierung der Kosten und des Eigengewichts erfordert u. a. einen effizienten Materialeinsatz bei der Gestaltung des Getriebegehäuses. Hierfür ist die Kenntnis der Betriebsbelastungen und der Gehäusebeanspruchung notwendig.

Die Belastungen sind vorwiegend von der Antriebsstrangkonfiguration und der Strecke abhängig. Die Beanspruchungen ergeben sich aus der Belastung und der Gestalt. Die Zusammenhänge zwischen den Einsatzbedingungen der Busse und den Beanspruchungen der Gehäuse sind unzureichend bekannt. Des Weiteren ist unklar, wie sich verschiedene Antriebsstrangkonfigurationen auf die Betriebsfestigkeit der Gehäuse auswirken.

2. Belastungen der Getriebegehäuse

Die Belastungen der Gehäuse sind insbesondere auf die Längsdynamik des Busses, auf Fahrbahnunebenheiten und auf Schwingungen zurückzuführen. Aufgrund der Längsdynamik entstehen am Getriebegehäuse Momente durch Kupplungen und den Retarder sowie Lager- und Stützkkräfte. Die Kräfte und Momentenverläufe werden, wie in [2] ausführlich beschrieben, mit Hilfe von Versuchen und Simulationen ermittelt. In Bild 1 sind exemplarisch die

Verläufe eines Kupplungsmoments, des Retardermoments und einer Lagerkraft dargestellt. Die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen des Busses sind erkennbar.

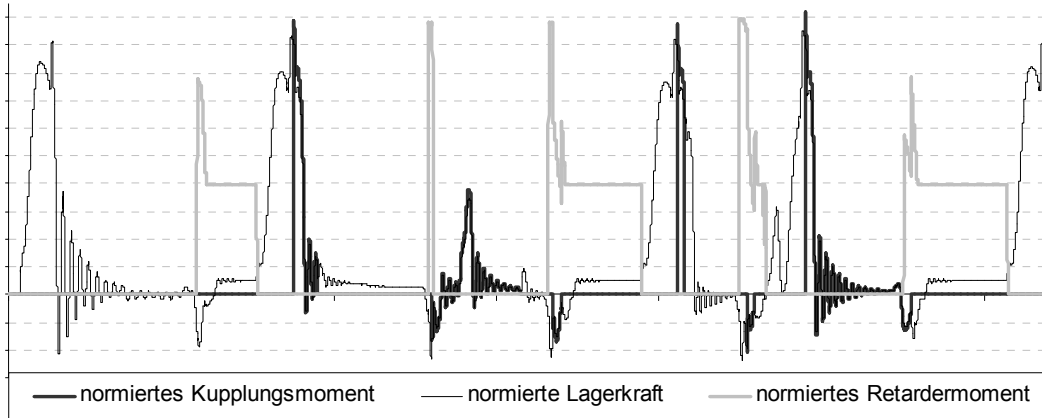


Bild 1: Ausschnitt aus den normierten Kräfte- und Momentenverläufen eines Stadtzyklus

Die Fahrbahnunebenheiten belasten das Gehäuse infolge der Massenkräfte des Getriebes. Da die Fahrbahnunebenheiten starken stochastischen Schwankungen unterliegen, wurden Messungen der Vertikalbeschleunigung an einem ähnlichen Getriebe durchgeführt. Die Vertikalbeschleunigungen im Stadtverkehr sind relativ gering. Deshalb wurden zusätzliche Messungen auf extremen Schlechtwegstrecken gemacht. Bild 2 zeigt den Verlauf der normierten Vertikalbeschleunigung am Getriebegehäuse.

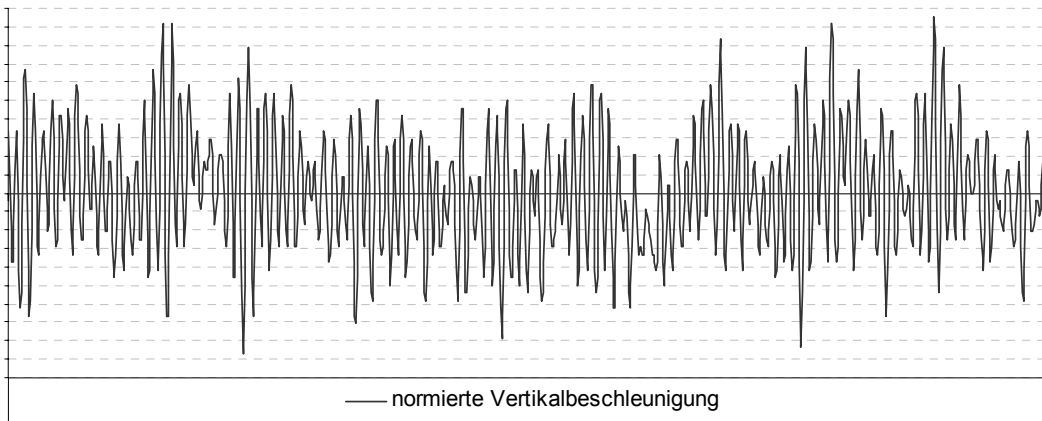


Bild 2: Ausschnitt der normierten Vertikalbeschleunigung auf einer Schlechtwegstrecke

Es hat sich gezeigt, dass im Stadtverkehr die Belastungen aufgrund der Längsdynamik die wesentliche Rolle spielen, während die Vertikalbeschleunigung vernachlässigt werden kann. Hingegen treten auf einer extremen Schlechtwegstrecke aufgrund des angepassten Fahrverhaltens nur geringe fahrdynamische Belastungen auf.

Insbesondere infolge der Massenkräfte zweiter Ordnung können Motor und Getriebe zu Biegeschwingungen im Rahmen angeregt werden. Im vorliegenden Fall wurde durch eine

Schwingungsuntersuchung des Motor-Getriebesystems gezeigt, dass die kritischen Eigenfrequenzen stets deutlich über der Anregungsfrequenz liegen und somit keine relevanten Belastungen infolge motorinduzierter Schwingungen auftreten.

3. Ermittlung der Beanspruchungen

Für die Ermittlung der Beanspruchung wurde das Gehäuse samt Anbauteilen wie Ölwanne, Lagerträger, Abtriebsdeckel etc. aus Tetraeder- und Hexaederelementen modelliert. Eine reine Modellierung aus Hexaederelementen ist aufgrund der Komplexität der Geometrie und des dadurch wesentlich größeren Vernetzungsaufwandes bzw. der erforderlichen Geometrievereinfachung nicht sinnvoll. Die zu untersuchenden Bereiche wurden sehr fein mit parabolischen Tetraederelementen vernetzt, da ausführliche Untersuchungen ergaben, dass mit einem entsprechend diskretisierten parabolischen Tetraedernetz sich die beste und zeit-effizienteste Modellierung ergibt. Das FE Netz mit ca. 1,35 Mio. Elementen ist in Bild 3 dargestellt.

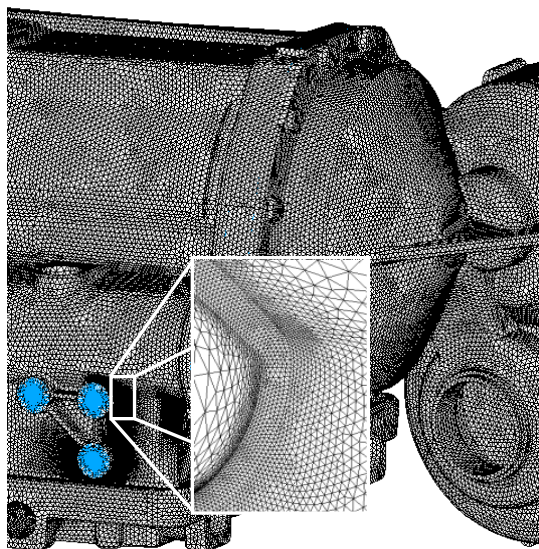


Bild 3: Finite Elemente Netz des Getriebes samt Anbauteilen

Die Belastungen wurden an den entsprechenden Stellen als Einheitslasten wirkend auf das Gehäuse bzw. die Anbauteile aufgebracht. Durch entsprechende Wahl der Lasten ist es möglich, den Schaltvorgang zu berücksichtigen. Wie in Bild 4 zu sehen, können in den einzelnen Lastfällen grundsätzlich verschiedene Spannungsverläufe am Gehäuse auftreten. Im vorliegenden Fall kann die gesamte Getriebelastung zu jedem Zeitpunkt durch eine Linearkombination von 7 Lastfällen abgebildet werden. Für jeden dieser Lastfälle wird an den

interessierenden Knoten der linearelastische Spannungstensor sowie der Spannungsgradientenvektor der entsprechenden Vergleichsspannung ermittelt.

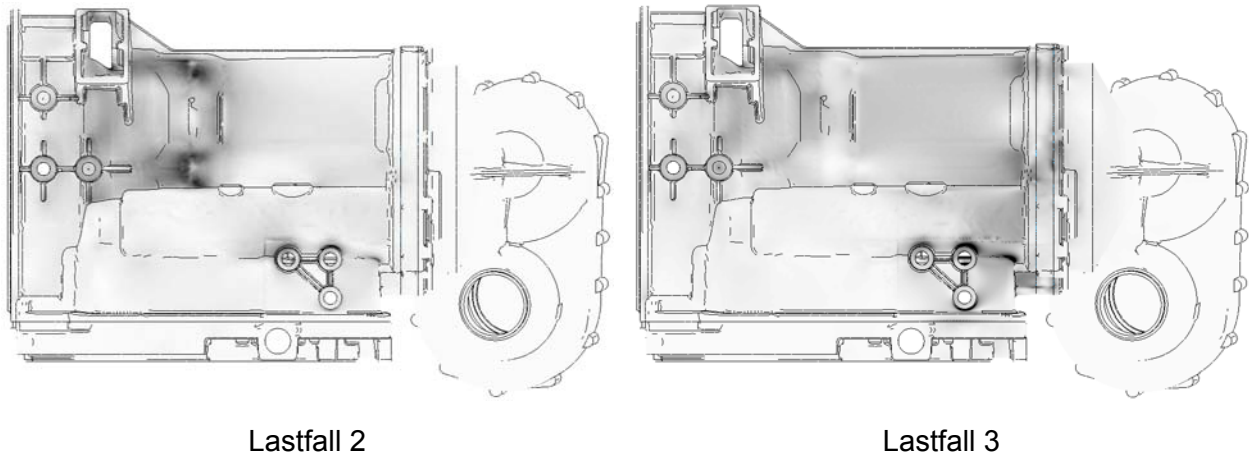


Bild 4: Spannungsverlauf am Gehäuse bei unterschiedlichen Lastfällen

4. Betriebsfestigkeitsabschätzung

Das Gehäuse wird aus EN AC-AlSi9Cu3(Fe) gegossen. Die Werkstoffdaten wurden aus der FKM-Richtlinie entnommen [3, 4]. Da zunächst nicht bekannt war, ob an bestimmten Stellen ein multiaxialer Spannungszustand vorliegt, wurde die Schädigung an allen Oberflächenknoten mit dem Verfahren der kritischen Schnittebene bestimmt. In Bild 5 ist die Schädigung D am Gehäuse für einen Stadtzyklus dargestellt. WinLIFE bietet die Möglichkeit mit dem Nennspannungskonzept und örtlichen Spannungs- sowie Dehnungskonzepten zu rechnen. Das Nennspannungskonzept ist aufgrund der komplexen Geometrie des Gehäuses ungeeignet. Die Betriebsfestigkeitsberechnung mit örtlichen Spannungs- sowie Dehnungskonzepten liefert am Gehäuse qualitativ den gleichen Schädigungsverlauf.

Als kritische Bereiche stellten sich die Aufhängepunkte und ein Übergang im hinteren Bereich heraus (Bild 5). Für die kritischen Bereiche wurde in Anlehnung an [5] ein Porositätsgrad von P kleiner als 4 nach ASTM E [6] zugewiesen. Eine Berücksichtigung des Spannungsgradienten liefert qualitativ denselben Verlauf der Schädigung. Quantitativ reduziert sich die rechnerische Betriebsfestigkeit um den Faktor 3. Durch eine konstruktive Überarbeitung der kritischen Bereiche konnte die rechnerische Lebensdauer um Faktor 13 gesteigert werden. In den kritischen Bereichen ergab sich ein uniaxialer Spannungszustand. WinLIFE bietet die Möglichkeit bei multiaxialer Belastung an den kritischen Stellen multi- oder uniaxial zu rechnen.

Die Schädigung auf der Schlechtwegstrecke lag um den Faktor 10^3 unter der Schädigung bei einem gleich langen Stadtzyklus. Somit ist die Gehäusebeanspruchung aufgrund von Fahrbahnunebenheiten im Gegensatz zur Belastung infolge der Längsdynamik gering.

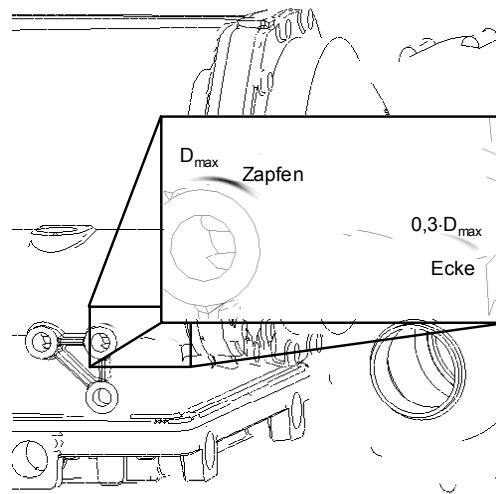


Bild 5: Schädigung am Gehäuse infolge Längsdynamik

5. Einfluss verschiedener Betriebsparameter auf die Gehäuseschädigung

Die Betriebsfestigkeit von Bauteilen wird maßgeblich von der Belastung und der Werkstofffestigkeit beeinflusst [7]. Komplexe Bauteile wie Getriebegehäuse unterliegen meist multiaxialen Belastungen. Die Belastungen, die auf das Gehäuse wirken, sind von einer Vielzahl an Betriebsparametern, wie z. B. Strecke, Beladung, Antriebsstrangkonfiguration, Motorisierung, Fahrverhalten etc. abhängig. Den Getriebehersteller interessiert weniger der Zusammenhang zwischen Bauteilbelastung und Bauteillebensdauer sondern vielmehr der Einfluss verschiedener Betriebsparameter des Fahrzeugs auf die Bauteillebensdauer. Die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und Bauteillebensdauer hilft kritischere und weniger kritische Betriebsparameter zu identifizieren sowie die Folgen der Änderung von Betriebsparametern abzuschätzen.

Im folgenden wurden über 20 internationale Stadt-, Überland- und Autobahnstrecken untersucht. Hierbei wurden Messfahrten von Voith, vom Steinbeis-Transferzentrum und standardisierte Zyklen (z. B. NEDC) mit und ohne Verkehrseinfluss betrachtet. Zusätzlich wurden weitere Parameter wie z. B. Steigung, Beladung und Rückwärtsfahrt variiert.

Aktuelle Forschungsergebnisse [8] zeigen, dass die rechnerische Lebensdauer oft stark von der tatsächlichen Lebensdauer eines komplexen Bauteils unter multiaxialer Beanspruchung abweicht. Der Versagensort sowie der Einfluss verschiedener Parameter kann jedoch zuverlässig abgeschätzt werden. Die vorgestellten Ergebnisse wurden basierend auf berechneten örtlichen Spannungen ermittelt.

In Bild 6 sind die rechnerisch erreichbare Gesamtstrecke bis zum Bruch und die Durchschnittsgeschwindigkeit auf verschiedenen Strecken dargestellt. Die Strecken sind nach erreichbarer Gesamtstrecke abnehmend sortiert. Eine große erreichbare Gesamtstrecke bedeutet eine geringe Beanspruchung bzw. Schädigung. Die geringste Beanspruchung tritt bei der Autobahnfahrt von Lyon nach Barcelona auf und liegt weit unter der Beanspruchung bei der Strecke Innenstadt, welche einen Stadtzyklus repräsentiert. Die Strecken NEDC (New European Driving Cycle; Euro3), Ostmalle-Stadt und Ostmalle-Überland dienen zur Messung der Abgasemissionen von Fahrzeugen. Bei diesen Strecken ergaben sich geringe Beanspruchungen des Gehäuses. Daher sind diese Zyklen nicht als kritische Fahrzyklen bzgl. der Beanspruchung anzusehen und somit für eine betriebsfeste Auslegung von Bauteilen ungeeignet.

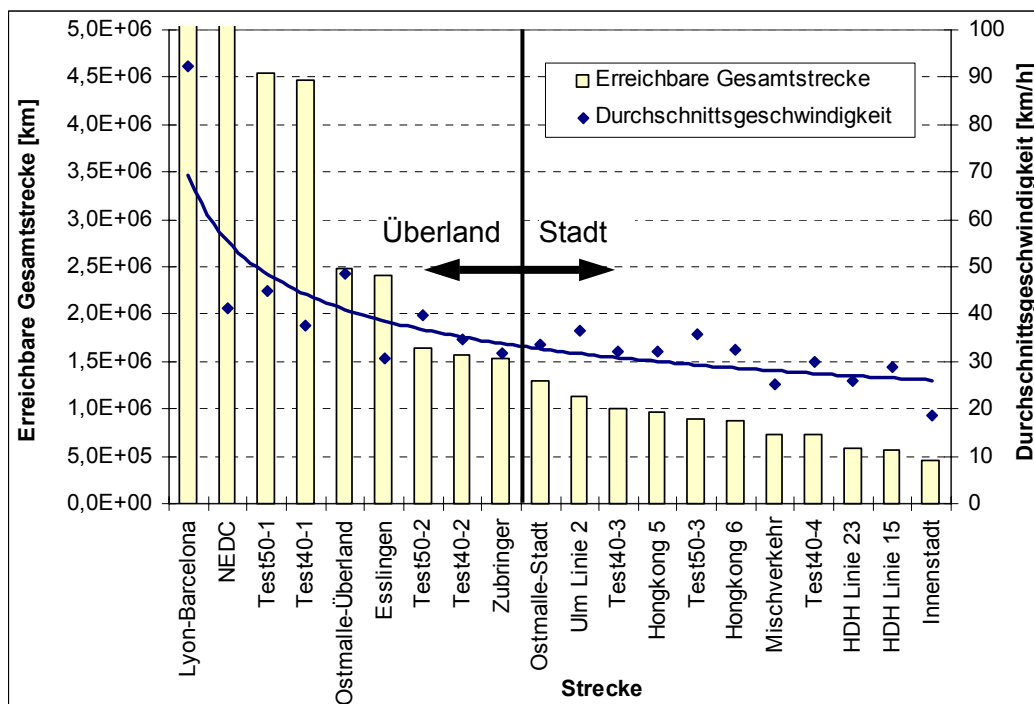


Bild 6: Rechnerisch erreichbare Gesamtstrecke und Durchschnittsgeschwindigkeit

Die Fahrten, bei denen der Verkehr berücksichtigt wurde, haben eine geringere Schädigung als die Fahrten ohne Verkehr. Das bedeutet, dass ein hohes Verkehrsaufkommen zwangsläufig zu einer moderateren Fahrweise führt. Die Autobahn bzw. Überlandstrecken weisen eine viel höhere erreichbare Gesamtstrecke als die Stadtstrecken auf. Esslingen als Stadt-

zyklus bildet infolge des Verkehrseinflusses eine Ausnahme. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen erreichbarer Gesamtstrecke und Durchschnittsgeschwindigkeit erkennbar. Dies darf aber auf keinen Fall zu dem Schluss führen, dass niedrige Geschwindigkeiten das Gehäuse besonders beanspruchen, sondern wie in Bild 7 zu erkennen, resultieren die niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten aus der hohen Anzahl an Stopps pro km. Es ist die bezogene Schädigung, d. h. die Schädigung pro Streckenlänge bezogen auf die maximale Schädigung pro Streckenlänge aller Strecken aufgetragen:

$$D_{\text{bez}} = \frac{D_i}{s_i} \cdot \frac{s_{D,\text{max}}}{D_{\text{max}}}$$

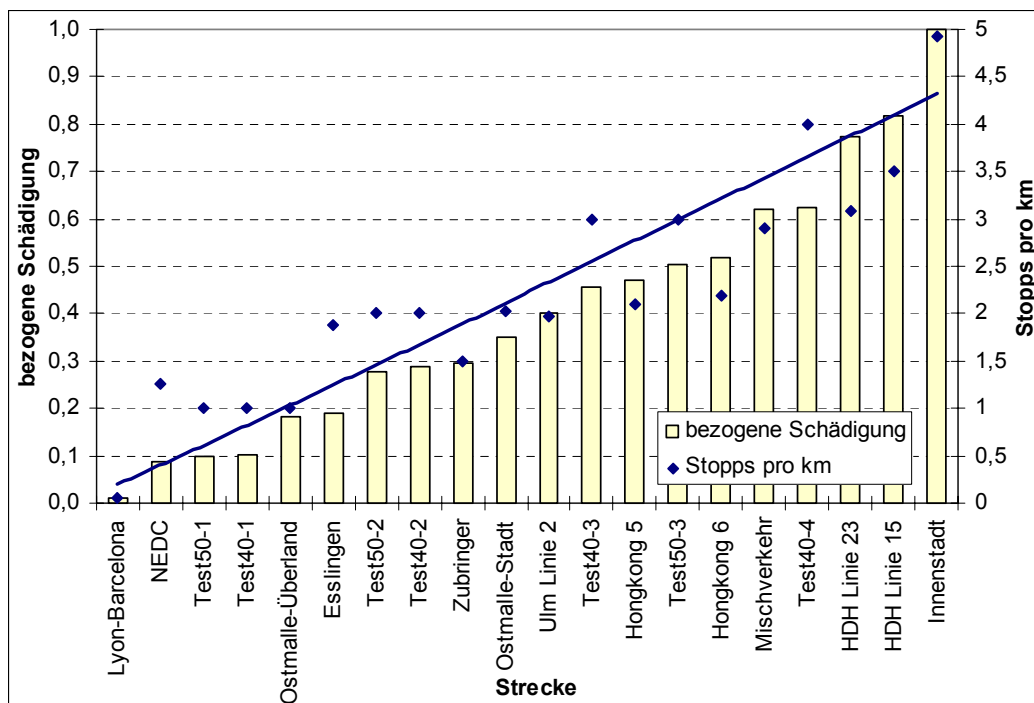


Bild 7: Bezogene Schädigung und Stopps pro km

Die hohe Anzahl an Stopps und die sich daraus ergebenden Anfahrvorgänge führen zu einer hohen Anzahl an Lastwechseln und somit zu einer hohen Schädigung.

Viele Anfahrvorgänge bedeuten auch viele Schaltungen (Bild 8) und einen hohen Verbrauch (Bild 9). Die Schaltheufigkeit bei den Überlandzyklen (z. B. Lyon-Barcelona = 0,38 Schaltungen pro km, Zubringer = 28,5 Schaltungen pro km) variiert stärker als bei den Stadtzyklen (z. B. Ostmalle-Stadt = 12 Schaltungen pro km, Innenstadt = 23 Schaltungen pro km). Bei den Stadtzyklen tritt bei einer hohen Schaltheufigkeit eine hohe Schädigung auf. Eine genaue Betrachtung der Schaltung hat ergeben, dass die durch den Schaltvorgang hervorgerufene Belastungserhöhung an Kupplungen und Zahnrädern (Momentenerhöhung) keinen bemerkenswerten Einfluss auf die Gehäuseschädigung hat.

Ein hoher Verbrauch korreliert mit einer hohen Schädigung. Für die untersuchten Strecken lag der durchschnittliche Verbrauch im Überlandverkehr bei 32 l/100 km und im Stadtverkehr bei 52 l/100 km.

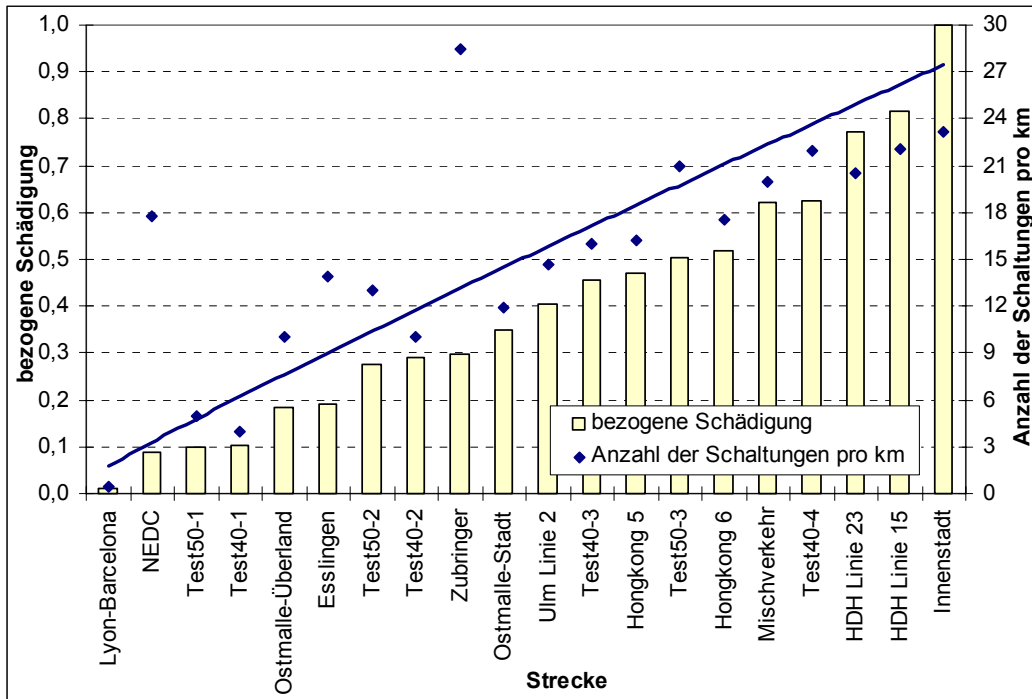


Bild 8: Bezogene Schädigung und Anzahl der Schaltungen

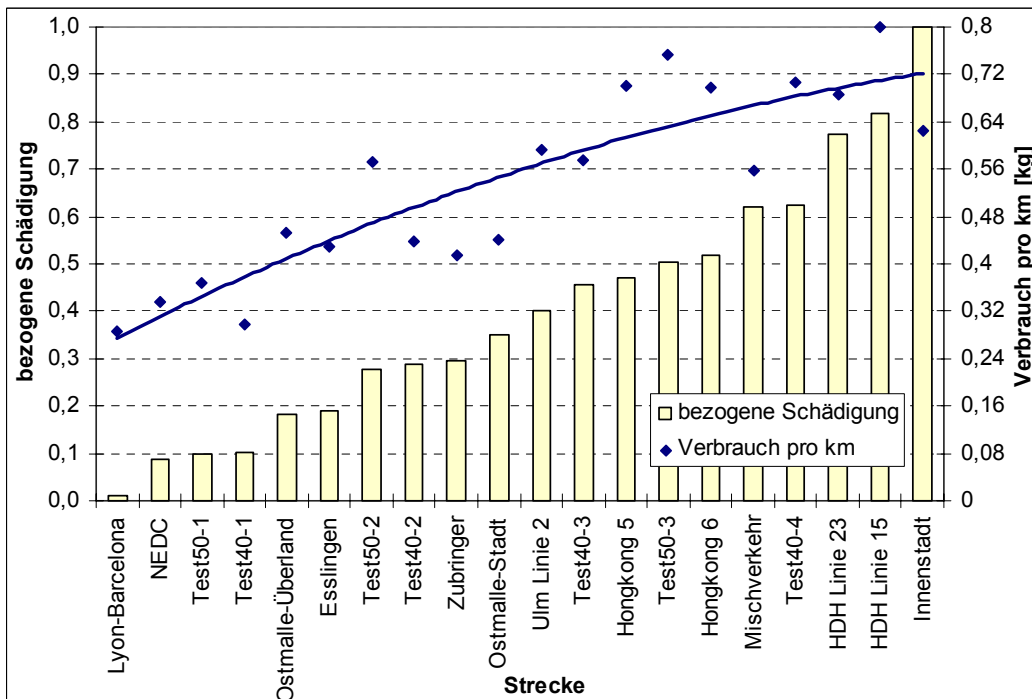


Bild 9: Bezogene Schädigung und Verbrauch

Zwischen Schädigung und Beschleunigung ist nach Bild 10 kein Zusammenhang zu erkennen. Sowohl die bei den untersuchten Strecken auftretende Maximalbeschleunigung und die Maximalverzögerung sowie die sich daraus als Differenz ergebende Beschleunigungsbreite zeigen über alle Strecken ein relativ gleichmäßiges Verhalten. Busse erreichen Beschleunigungen bis $2,2 \text{ m/s}^2$ und verzögern mit bis zu 3 m/s^2 . Die mittlere Maximalbeschleunigung der untersuchten Strecken beträgt $1,8 \text{ m/s}^2$ und die gemittelte Maximalverzögerung $2,4 \text{ m/s}^2$, wodurch sich eine mittlere Beschleunigungsbreite von $4,2 \text{ m/s}^2$ ergibt. Bei der Strecke Innenstadt, welche die höchste Schädigung aufweist, tritt aufgrund der geringsten Verzögerung im Vergleich zu den anderen Zyklen die geringste Beschleunigungsbreite auf. Die maximale Beschleunigung liegt im Bereich der Beschleunigungen, die auf anderen Strecken erzielt werden. Dies deutet darauf hin, dass in der vorliegenden Antriebsstrangkonfiguration die Verzögerung einen geringeren Einfluss auf die Schädigung hat als die Beschleunigung. Eine Betrachtung der Steigung der einzelnen Zyklen im Vergleich zur Schädigung lässt keinen Zusammenhang erkennen (Bild 11). Obwohl die Teststrecke HDH Linie 15 große Steigungen und eine hohe Schädigung aufweist, wird beim Innenstadtzklus in der Ebene eine höhere Gehäusebeanspruchung und somit höhere Schädigung verursacht. Dies ist auf die hohe Anzahl an Stopps und der daraus resultierenden hohen Anzahl an Lastwechseln am Gehäuse beim Innenstadtzklus zurückzuführen.

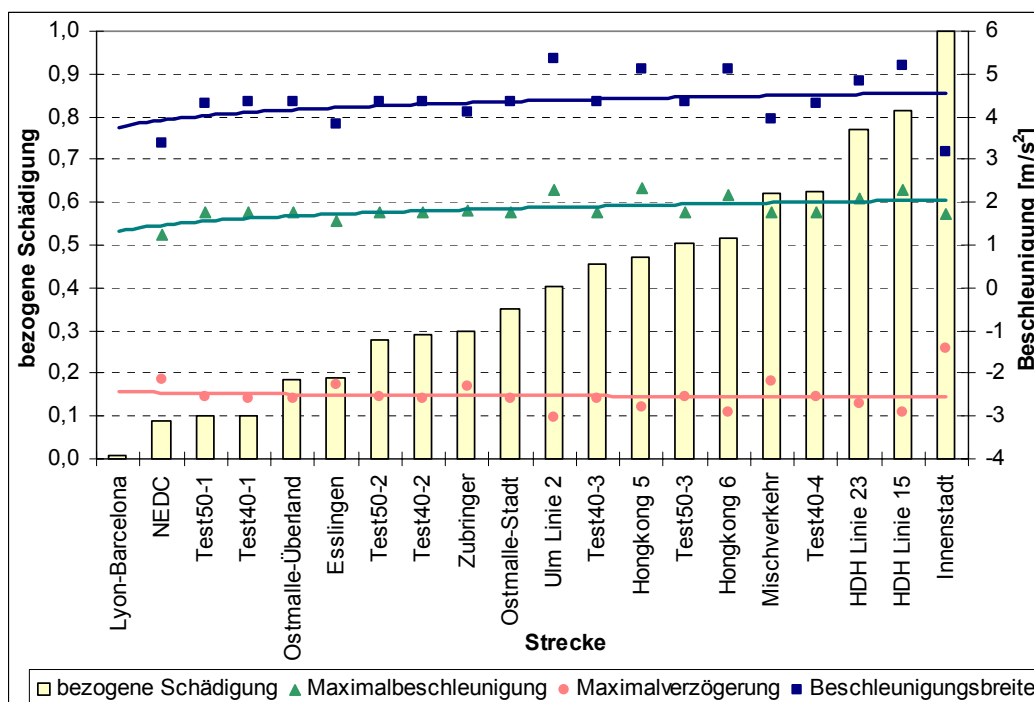


Bild 10: Bezogene Schädigung und Beschleunigung

Bei Rückwärtsfahrt können sich Vorzeichen von Kupplungsmomenten bzw. Lagerkräften ändern. Dies bewirkt evtl. eine starke Erhöhung der Beanspruchungsamplitude. Eine genaue Untersuchung des Einflusses der Rückwärtsfahrt auf die Gehäuselebensdauer ergab, dass die rechnerische Lebensdauer des Gehäuses sich um knapp 6 % reduziert, wenn die Rückwärtsfahrt mit berücksichtigt wird. Somit ist der Einfluss der Rückwärtsfahrt auf die Gehäuselebensdauer von Automatgetrieben gering.

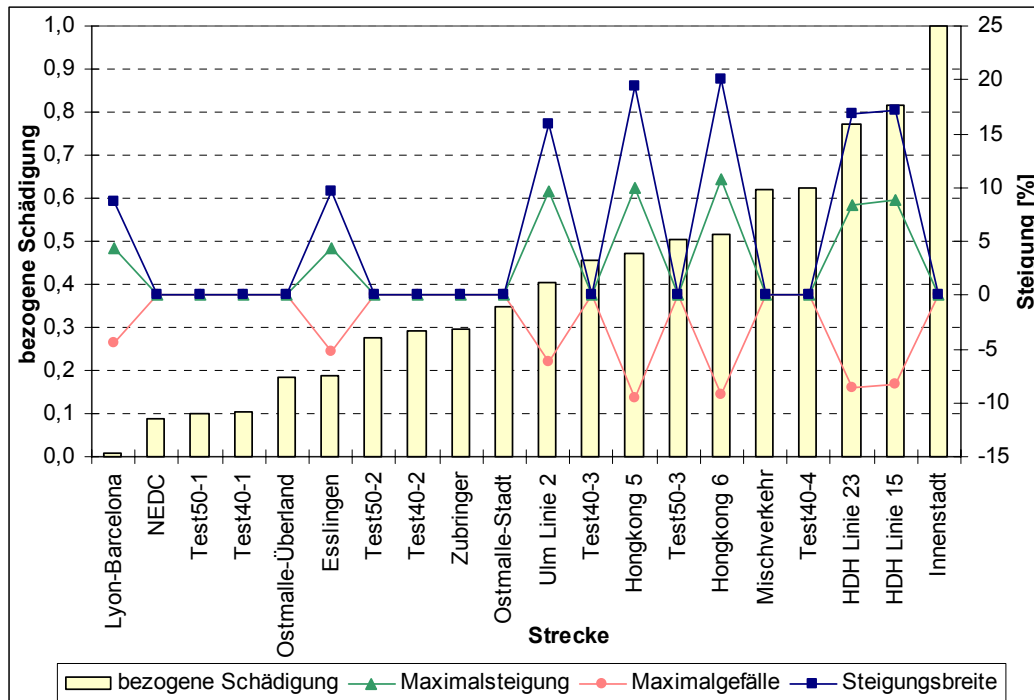


Bild 11: Bezogene Schädigung und Steigung

Die Anzahl der Fahrgäste eines Busses ändert sich ständig. Eine durchschnittliche Anzahl von Fahrgästen bzw. ein Kollektiv für die Anzahl der Fahrgäste ist aufgrund der vielen Einflussgrößen nur unbefriedigend für alle Strecken abschätzbar. Sicher ist, dass kein Bus immer vollbesetzt bzw. leer fährt. Die Anzahl der Fahrgäste hat direkten Einfluss auf die Gesamtmasse des Fahrzeugs und somit evtl. auch auf die Gehäusebeanspruchung. In Bild 12 ist die bezogene Schädigung der Strecke Test40-3 in Abhängigkeit von der Gesamtmasse dargestellt. In einem vollbesetzten Bus wird das Gehäuse stärker beansprucht als in einem leeren Bus. Die Beanspruchung des Gehäuses im leeren Standardbus beträgt 50 % der Schädigung im vollbesetzten Gelenkbus. Für die Betriebsfestigkeitsabschätzung von Busgetriebegehäusen soll von einem vollbesetzten Bus ausgegangen werden.

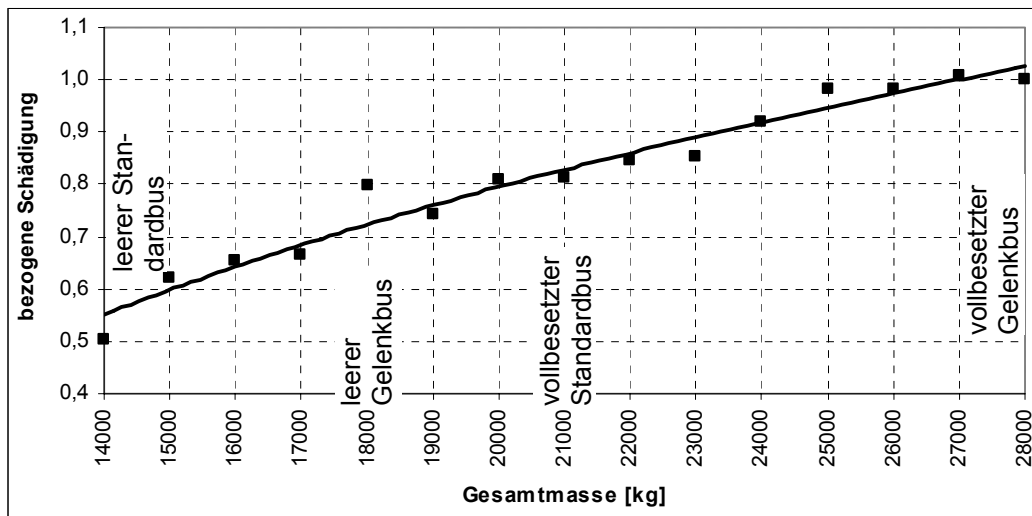


Bild 12: Einfluss der Gesamtmasse, Test40-3

6. Durchführung der Lebensdauerberechnung in winLIFE

Um derartig aufwendige Untersuchungen durchführen zu können, müssen modernste Werkzeuge eingesetzt werden. Wie in Bild 13 zu erkennen, werden Simulations-, Berechnungs- und Messprogramme aus verschiedenen Bereichen eingesetzt, die dank komfortabel implementierter Schnittstellen problemlos zusammenarbeiten.

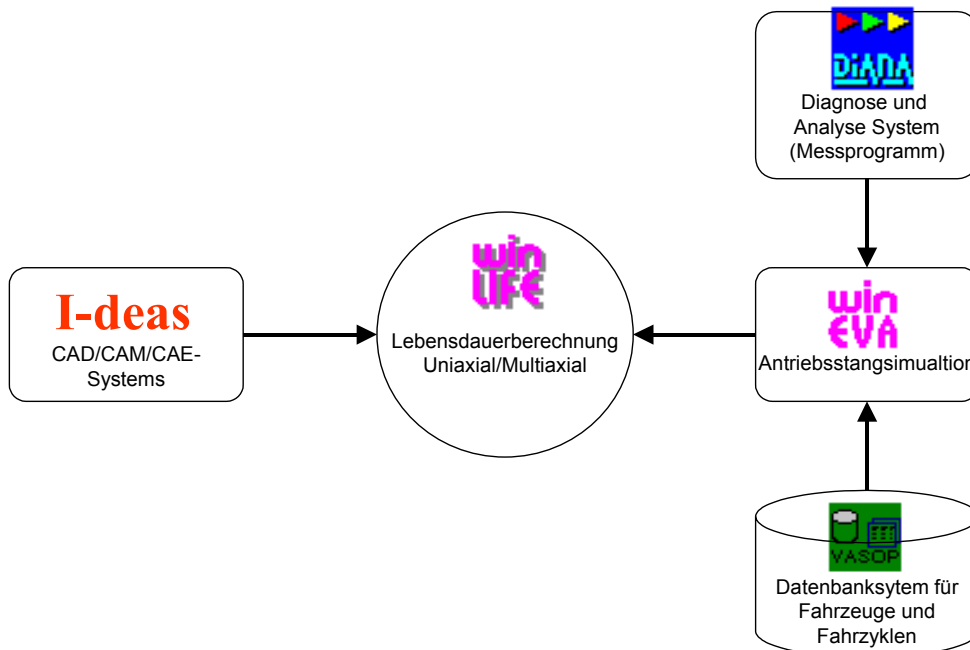


Bild 13: Zusammenwirken der verschiedenen Programme

Die große Zahl der notwendigen Rechenoperationen führt zu erheblichen Rechenzeiten, so dass eine Lebensdauerberechnung des Gehäuses für eine reale Strecke mehrere Wochen dauert, wenn alle Knoten der FE-Struktur berechnet werden.

Um eine Vorstellung für die ungeheuren Datenmenge zu bekommen, sei ein einfaches Zahlenbeispiel gegeben:

- Bei der Drehschwingungssimulation wird mit einer Mindestschrittweite von 10^{-4} Sekunden gerechnet, wobei nur jeder 10. Wert gespeichert wird.
- In den vorliegenden Untersuchungen betrug die durchschnittliche Streckenlänge 38,2 km und die Durchschnittsgeschwindigkeit 36,6 km/h. Dies ergibt pro Last-Zeitfunktion $3,7 \cdot 10^6$ Werte ($38200 \text{ m} \cdot 10^{-4} \text{ s} \cdot 10 / 10,2 \text{ m/s}$).
- Das FE-Modell wurde mit $3 \cdot 10^5$ Oberflächenknoten modelliert.
- Es wird mit 20 Schnittebenen pro Knoten gerechnet.
- Für jeden Last-Zeitpunkt sind rund 50 Rechenoperationen notwendig.
- Ein moderner Rechner (Pentium IV mit 1,5 GHz) schafft theoretisch 2000 MFLOPS (Millions Floating Point Operations per Second).
- Theoretische Rechenzeit:
 $3,7 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 50 / 2 \cdot 10^9 \text{ (FLOPS)} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ s}$ oder rund 6 Tage

Um mit dieser Datenmenge in einer akzeptablen Zeit Ergebnisse zu erzielen, kann in winLI-FE die Lebensdauerberechnung durch das in Bild 14 dargestellte Vorgehen erheblich verkürzt werden.

Die "Grobanalyse" ist eine Berechnungsweise, bei welcher eine gute qualitative Aussage darüber gemacht werden kann, in welchem Bereich des Bauteils die Knoten mit den größten Schadenssummen liegen. Quantitativ kann bei der "Grobanalyse" das Ergebnis sehr ungenau sein. Die "Grobanalyse" ist jedoch so angelegt, dass sie sehr kurze Rechenzeiten hat und somit alle Knoten mit einer vertretbaren Rechenzeit gerechnet werden können. Bei der "Grobanalyse" wird eine Datei erzeugt, in der die kritischen Knoten der Schadenssumme entsprechend sortiert sind. Diese kann für die anschließende "Feinanalyse" verwendet werden.

Bei der "Feinanalyse" werden die bei der "Grobanalyse" automatisch selektierten kritischen Knoten mit der notwendigen Genauigkeit gerechnet. Diese Rechenweise beansprucht zwar wesentlich mehr Rechenzeit pro Knoten, jedoch entstehen durch die begrenzte Anzahl der Knoten wieder vertretbare Rechenzeiten.

Um die kurzen Rechenzeiten bei der "Grobanalyse" realisieren zu können, wurden folgende Optimierungen angewandt:

- Erstellen einer Umkehrpunktfolge. Reduktion der Datenmenge in Bild 15a um den Faktor 250
- Anwenden einer Hysterese auf die Umkehrpunktfolge. Reduktion der Datenmenge in Bild 15b um den Faktor 4

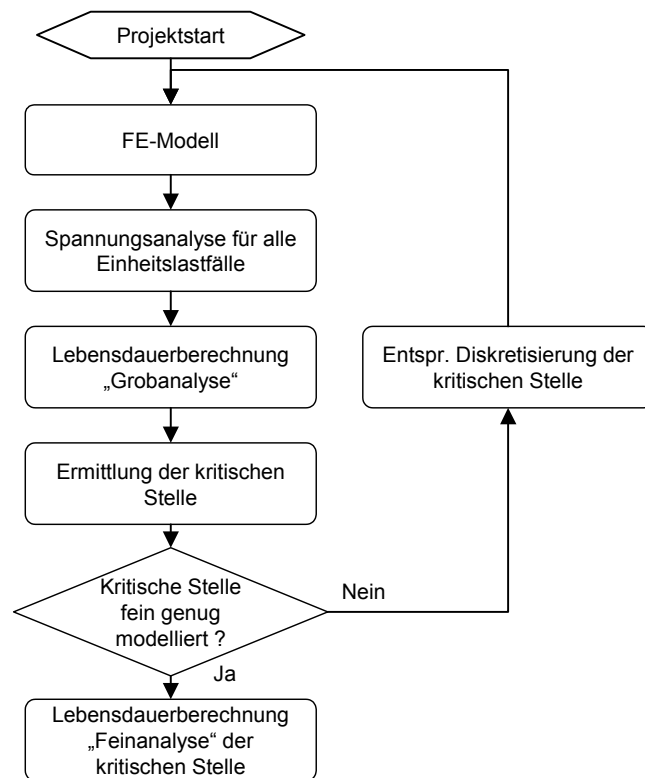


Bild 14: Vorgehen bei der rechenzeitoptimierten Lebensdauerberechnung

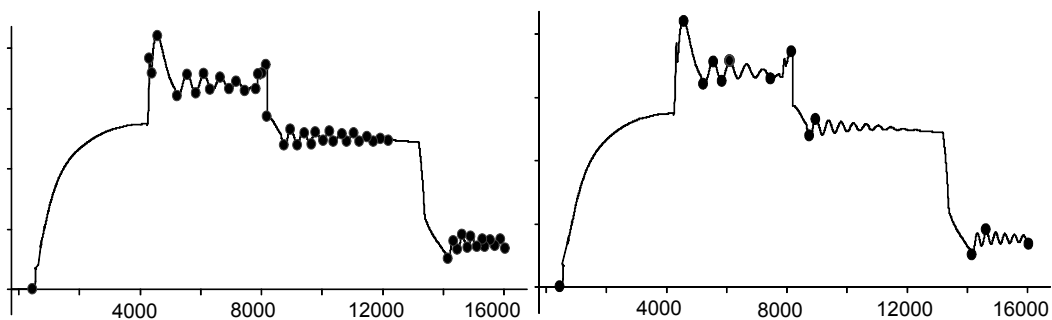


Bild 15a: Umkehrpunktfolge

b: Umkehrpunktfolge mit Hysterese

Wenn die Belastung auf eine Umkehrpunktfolge beschränkt wird, ist zu beachten, dass eine multiaxiale Berechnung aus mehreren Einzelbelastungen besteht. Aus jeder Einzelbelastung wird nun eine Umkehrpunktfolge mit Hysterese generiert. Da aber nicht davon ausgegangen

werden kann, dass die Umkehrpunkte jeder Einzelbelastung zum selben Zeitschritt auftreten, wird die Vereinigungsmenge aller Umkehrpunktfolgen verwendet (Bild 16).

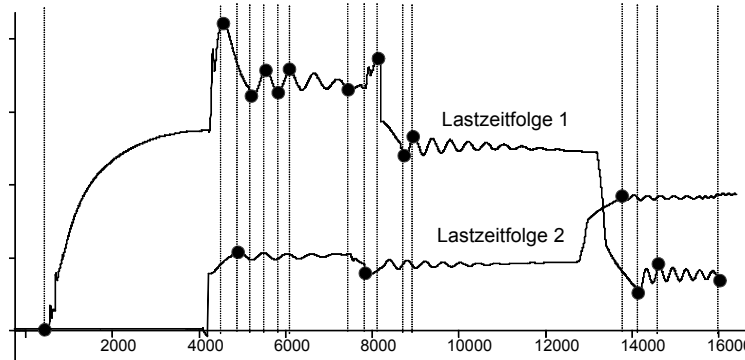


Bild 16: Vereinigungsmenge von zwei Umkehrpunktfolgen mit Hysterese

Bei der "Grobanalyse" empfiehlt es sich, weiterhin die Zahl der Schnittebenen (z. B. von 20 auf 8 Schnittebenen) und die Anzahl der Klassen bei der Rainflow-Klassierung (z. B. von 100 auf 50 Klassen) herabzusetzen. Durch diese Maßnahmen konnten die in Tabelle 1 angegebenen, vertretbaren Rechenzeiten mit einer akzeptablen Genauigkeit an den kritischen Knoten erzielt werden:

	Anzahl der berechneten Knoten	Rechenzeit "Grobanalyse"	Rechenzeit "Feinanalyse"	Rechenzeit "Feinanalyse" mit Spannungsgradient
Oberflächenknoten	305000	2:04:00 h	~42 Tage (abgebrochen)	
Kritische Knoten	2000	0:01:20 h	6:42:00 h	10:51:00 h

Tabelle 1: Aufgetretene Rechenzeiten für die Lebensdauerberechnung eines PIII (887 MHz)

7. Zusammenfassung

Zur Ermittlung der rechnerischen Lebensdauer von komplexen Bauteilen unter multiaxialer Belastung stehen in winLIFE mehrere Konzepte zur Verfügung. Mit diesen Konzepten ist es möglich, die kritischen Stellen an Bauteilen zu identifizieren und relative Aussagen über die Lebensdauer zu treffen.

Mit Hilfe der Lebensdauerberechnung wurde der Einfluss verschiedener Betriebsparameter auf die Gehäuseschädigung eines Nutzfahrzeug-Automatgetriebes untersucht. Motorinduzierte Schwingungen und Fahrbahnunebenheiten beanspruchen im Gegensatz zu Belastungen aufgrund der Fahrzeuglängsdynamik das Gehäuse wenig.

Eine Unterscheidung zwischen Stadt- und Überlandzyklen aufgrund der Gehäusebeanspruchung ist sinnvoll. Bei den Untersuchungen kristallisierten sich klare Zusammenhänge zwischen Durchschnittsgeschwindigkeit, Stopps, Anzahl der Schaltungen, Verbrauch und Schädigung heraus. Hohes Verkehrsaufkommen reduziert die Gehäusebeanspruchung. Eine geringe Durchschnittsgeschwindigkeit, viele Stopps, viele Schaltungen und hoher Verbrauch bedeuten eine hohe Beanspruchung. Die Fahrzeugverzögerung hat keinen Einfluss auf die Gehäuselebensdauer. Der Einfluss der Rückwärtsfahrt auf die Gehäuselebensdauer von Automatgetrieben ist gering. Für die Betriebsfestigkeitsabschätzung von Busgetriebegehäusen soll von einem vollbesetzten Bus ausgegangen werden.

Durch Schnittstellen zu verschiedenen Simulations- und Berechnungsprogrammen ist winLIFE sehr komfortabel in den Entwicklungsprozess integrierbar. Zur Rechenzeitoptimierung bei der Lebensdauerberechnung komplexer Bauteile bietet winLIFE verschiedene Möglichkeiten.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Willmerding, G., Jehlicka, E.: Verbrauchsuntersuchungen an Stadtbussen, Der Nahverkehr Heft 5, 1986
- [2] Körner, T., Depping, H., Klos, W., Häckh, J., Willmerding, W.: Rechnerische Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung realer Belastungskollektive für die Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes, DVM-Tagung Fulda, 5./6. Juni 2002
- [3] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe 1998, Forschungskuratorium Maschinenbau, 1998
- [4] FKM-Richtlinie: Festigkeitsnachweis Aluminium, Forschungskuratorium Maschinenbau, 1999
- [5] Sonsino, C. M., Lipp, K., Wiebelhaus, W., Piepenbreier, E.: Betriebsfestigkeitsnachweis von Aluminiumguss-Getriebegehäusen für schienengebundene Fahrzeuge, Sonderdruck aus „Bauteillebensdauer und Versuch“, S. 107-119, DVM, 1993
- [6] ANSI / ASTM E 155 – 79: Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings, 1979
- [7] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI Verlag 1989
- [8] Bericht zum FKM-Forschungsvorhaben 12043 "Lebensdauerberechnung mehraxial", 2002