

Radlastmessung an einem Elektrofahrzeug bei verschiedenen Fahrbahnbelägen inklusive Sonder- und Missbrauchereignissen

Cornelius Irmischer ¹⁾, Sebastian Koch ¹⁾, Dr.-Ing. Christian Daniel ¹⁾, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Elmar Woschke ¹⁾

¹⁾ Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, cornelius.irmischer@ovgu.de, 0391 67 52885

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Vergleichsmessungen der Radlasten an einem herkömmlich motorisierten Smart Fortwo und einem mit radnahen Motoren auf Elektroantrieb umgerüsteten Smart Fortwo „Editha 1“ vorgestellt. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Aussage über die Erhöhung der Radlasten durch den Anstieg der ungefederten Masse des umgerüsteten Fahrzeugs zu treffen. Die Messungen werden mit einem 6-Komponenten-Messrad auf verschiedenen Untergründen durchgeführt, wobei auch Sonderereignisse wie Schwellen- oder Schlaglochüberfahrten untersucht werden. Die Messdatenauswertung erfolgt in Form von Lastkollektiven, die für die unterschiedlichen Lastfälle ermittelt und anschließend überlagert werden. Extrapolationen werden herangezogen, um Aussagen über die zu erwartenden Belastungen in der gesamten Lebensdauer der Fahrzeuge zu treffen. Es zeigt sich, dass die Radlasten des umgerüsteten Fahrzeugs deutlich höher sind. Allerdings ist es schwierig, diesen Anstieg allein auf die Erhöhung der ungefederten Masse zurückzuführen, da das umgerüstete Fahrzeug insgesamt deutlich schwerer ist.

Schlüsselwörter: Elektromobilität, radnaher Antrieb, Radlasten, Fahrwerksauslegung, Messrad, Belastungskollektive, Betriebsfestigkeit

1. Einleitung

Im Zuge strengerer Abgasvorschriften und der Diskussion um Fahrverbote für Dieselfahrzeuge ist das Interesse an einem Ausbau der Elektromobilität nach wie vor sehr groß. Die vielfältigen Forschungsarbeiten zu diesem Thema an der OvGU Magdeburg sind im Projekt Competence in Mobility (CoMo, [1]) gebündelt und beinhalten unter anderem die Weiterentwicklung und Applikation eines kompakten Radnabenmotors. Durch die Montage des Antriebs direkt am Rad lässt sich einerseits der Raumbedarf der Komponenten des elektrischen Antriebs im Fahrzeug weiter reduzieren, andererseits wird jedoch die für Fahrkomfort und Fahrwerksbeanspruchung maßgebliche ungefederte bzw. nur durch den Reifen gefederte Masse erhöht. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss dieser Massenerhöhung zu quantifizieren.



Bild 1: (a) Elektrosmart „Editha 1“ mit montiertem Messrad, (b) Detailaufnahme Messrad

Daher werden im Teilprojekt CoMo – Fahrdynamik und Radlasten am IFME Messungen zur Untersuchung des Belastungsanstiegs am Rad durchgeführt. Diese Messungen erfolgen an dem in Bild 1(a) gezeigten Smart Fortwo

„Editha 1“¹ mithilfe des in Bild 1(b) dargestellten Messrads, das eine Ermittlung der wirkenden Kräfte und Momente in allen drei Raumrichtungen ermöglicht. Die sehr robuste Messtechnik erlaubt Messungen auf verschiedenen Untergründen. Durch Zusammenfassung verschiedener Messungen in Belastungskollektiven und deren Extrapolation ist die Ableitung repräsentativer Aussagen für die Belastung in der gesamten Lebensdauer des Fahrzeugs möglich.

Letztendlich ist durch diese Arbeit die Abschätzung der zusätzlichen Fahrwerksbeanspruchung möglich und sie erlaubt es, deutlich präzisere Lastannahmen zu treffen. Damit wird dem Konstrukteur ein wichtiges Hilfsmittel für den Produktentwicklungsprozess zur Verfügung gestellt.

2. Messungen

2.1 Messtechnik

Die Messungen wurden mit einem Messrad der Firma CAEMAX durchgeführt. Das wesentliche Bauteil dieses Messrades ist ein Messwertaufnehmer (Wheel force transducer – WFT), in dem die wirkenden Kräfte und Momente mit Dehnungsmessstreifen aufgenommen werden. Die Messdaten werden direkt im Messwertaufnehmer digitalisiert und zunächst mit einer maximalen Samplingrate von 5000 Hz an ein Datenerfassungssystem übertragen, von dem aus sie in Echtzeit auf einem Laptop angezeigt werden können. Mit einem passenden Adapter wird der Messdatenaufnehmer an der Nabe des Fahrzeugs montiert. Zur Vorbereitung der Messung müssen lediglich das Rad gewechselt und die Vorrichtung zur Datenübertragung montiert werden. Das Messrad ist wasserdicht, hat einen Messbereich von $F_x, F_z = \pm 45 \text{ kN}$; $F_y = \pm 25 \text{ kN}$, $M_x, M_z, M_y = \pm 8.75 \text{ kNm}^2$ und ist stoßfest bis 50 g [3]. Per Knopfdruck am Messdatenerfassungssystem wird das Rad kalibriert, wofür lediglich wenige Radumdrehungen bei langsamer, nicht angetriebener Fahrt erforderlich sind. Somit handelt es sich bei dem Messrad um ein einfach zu bedienendes und gleichzeitig sehr robustes Messwerkzeug, das auch für die Erfassung von Sonder- und Missbrauchereignissen geeignet ist.

2.2 Messfahrzeuge

Mit Editha 1 als hauptsächlichem Untersuchungsgegenstand wurde die Mehrzahl der Messungen durchgeführt. Es handelt sich um einen Smart Fortwo der Baureihe 450, in den statt des Verbrennungsmotor-Antriebsstrangs ein elektrischer Antriebsstrang mit einer Leistung von $2 \times 10.25 \text{ kW}$ (Dauerleistung) und einer Batteriekapazität von 15.6 kWh eingebaut wurde. Die zwei Elektromotoren wurden mithilfe zweier modifizierter Radträger direkt an der Hinterachse montiert [4]. Dadurch erhöht sich die ungefederte Masse pro Rad um ca. 22 kg.

Zum Vergleich wurden Messfahrten mit einem baugleichen Smart Fortwo mit dem originalen Dieselantrieb durchgeführt. Das Mehrgewicht von Editha gegenüber diesem Fahrzeug beträgt 220 kg. Abgesehen von diesen Unterschieden sind die beiden Fahrzeuge baugleich, weshalb auch derselbe Adapter zur Montage des Messwertaufnehmers an der Radnabe verwendet werden konnte.

2.3 Durchgeführte Messungen

Ziel der Messungen war es, einen möglichst breiten Betriebsbereich des Fahrzeugs abzudecken. Deshalb wurden Messungen unter den in Tab. 1 angegebenen Bedingungen durchgeführt.

Tab. 1: Messzeiten der verschiedenen Fahrzustände

Lastfall	Messzeit Editha I	Messzeit Original-Smart
Stadtverkehr Gute Straße (50 km/h)	5000 s	2500 s
Stadtverkehr Schlechte Straße (30-50 km/h)	1560 s	1450 s
Kurvige Landstraße (60-80 km/h)	1100 s	300 s
Sehr gute Landstraße o. Kurven, autobahnähnlich (90 km/h)	900 s	950 s
Sonderereignisse (nur relevante Messdatenabschnitte)	230 s	210 s

¹ Forschungsfahrzeug für Elektromobilität der OvGU, auf Elektroantrieb mit radnahen Motoren umgerüstet [2]

² Standard-Fahrzeug-Koordinatensystem: x = Fahrzeuglängsachse, y = Raddrehachse, z = Vertikale Achse

Messungen, bei denen Kalibrierungsprobleme oder sonstige Fehler auftraten, sind in dieser Tabelle nicht angegeben. Bis auf eine lange Einzelfahrt auf guter Landstraße wurde jede Strecke mindestens fünfmal abgefahren, um statistische Abweichungen zu erfassen und eine valide Ausgangsbasis für die Extrapolationen zu schaffen (siehe Abschnitt 4.1). Da Anregungen des Fahrzeugs durch die Fahrbahn in einem Frequenzbereich bis etwa 30 Hz auftreten [5], ist die für die Messungen gewählte Abtastrate von 1000 Hz ausreichend. Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten erfolgt mithilfe eines MATLAB-Programms und besteht im Wesentlichen aus einer Rainflow-Zählung, der Darstellung der Messung als Lastkollektiv und der Berechnung einer Interpolationsfunktion. Die Interpolationsfunktion kann anschließend auf längere Fahrzeiten umgerechnet werden. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der einzelnen Schritte dargestellt.

3. Theoretische Hintergründe zur Messdatenauswertung

3.1 Zählverfahren

Die Messungen werden als Belastungs-Zeit-Funktionen (BZF) für Kräfte und Momente in den drei Raumrichtungen aufgezeichnet. In diesem Format ist ein qualitativer Vergleich und eine Aussage über den Schädigungsinhalt eines Belastungszustandes jedoch sehr schwierig. Da weniger die Schwingungsfrequenz als vielmehr die Anzahl und Höhe der auftretenden Amplituden für die Bauteilschädigung entscheidend sind [6], spielen Zählverfahren auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeit eine große Rolle. Dabei werden die auftretenden Belastungen bzw. Beanspruchungen nach Höhe und Häufigkeit der Schwingspiele geordnet, es erfolgt also ein Übergang vom Zeitbereich in den Häufigkeitsbereich. Eine Übersicht über die große Anzahl der unterschiedlichen Zählverfahren kann Köhler et al. [6] entnommen werden, worin dazu folgende Aussage getroffen wird: „Die Rainflow-Zählung [...] wird heute als das Zählverfahren angesehen, mit dem der Schädigungsinhalt einer BZF am besten erfasst wird“. Dieses Zählverfahren wird daher für die Auswertung der Messungen verwendet und im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

3.2 Rainflow-Zählung

Die Beschreibung der Rainflow-Zählung erfolgt sehr häufig mithilfe der Analogie von Regen, der an Pagodendächern entlang fließt bzw. an ihnen herabtröpft. Zur besseren Anschaulichkeit wird die BZF gedreht, sodass die Zeitachse von oben nach unten läuft. Für den Verlauf des Regens entlang dieser Funktion existieren mehrere Regeln [7]

- Der Regenfluss beginnt am Anfang der Messung und der Regen fließt immer an der Innenseite jedes lokalen Extremums entlang
- Der Regen tropft von den Zacken im Verlauf nach unten und läuft dort und entlang der Flanke hinter dieser Zacke weiter, bis er im weiteren Verlauf auf ein Maximum (Minimum) trifft, das größer (kleiner) ist als der Wert, von dem er gestartet ist
- Der Fluss stoppt auch, wenn er auf den Regenfluss eines Dachs darüber trifft
- Die horizontale Länge jedes Flusses wird als halber Zyklus gezählt.
- Jeder Abschnitt der BZF wird nur ein einziges Mal gezählt.

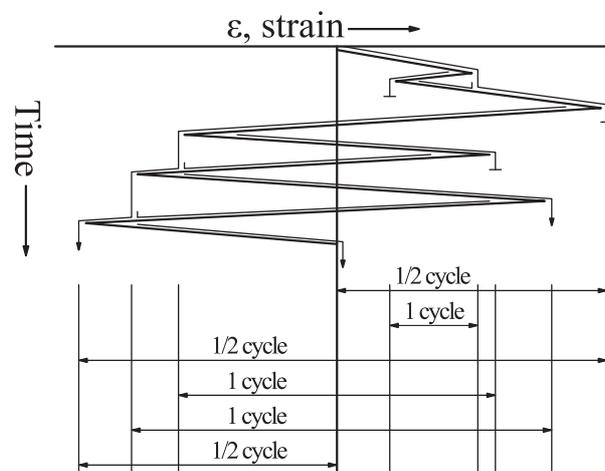


Bild 2: Beispiel-BZF Rainflow-Zählung [7]

Bild 2 zeigt ein Beispiel für dieses Verfahren. Ergebnis der Zählung sind vollständige Zyklen und einige halbe Zyklen, die als Residuum bezeichnet werden. Das Residuum hat bei kurzen BZF einen nicht vernachlässigbaren Einfluss. Köhler et al. [6] geben einen Grenzwert von 100 000 vollständigen Schwingungen an, oberhalb dessen das Residuum in der Regel vernachlässigt werden kann. Dieser Grenzwert wurde bei den durchgeführten Messungen in der Regel nicht überschritten. In den vorgestellten Messauswertungen werden die halben Zyklen daher mitberücksichtigt und zur Sicherheit so behandelt, als ob sie vollständige Schwingungen wären. Für die Schwingungen werden Amplitude, Mittelwert, Beginn der Schwingung sowie die Periodendauer gespeichert. Aus diesen Daten lassen sich auch die Ergebnisse einiger anderer Zählverfahren ableiten.

In der praktischen Anwendung zeigt sich, dass eine große Anzahl von Schwingungen mit sehr geringen Amplituden auftritt. Diese stammen in der Mehrzahl aus hochfrequenten Schwingungen, die für das Fahrwerk keine wesentliche Bedeutung haben. Da Schwingungen deutlich unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze zudem kaum Schädigung im Körper hervorrufen, ist es zulässig, bspw. zur Angleichung der Schwingungszahl von Vergleichsmessungen kleine Amplituden zu vernachlässigen.

3.3 Belastungskollektive

Nach der Zählung lassen sich die Ergebnisse der einzelnen Messfahrten sehr übersichtlich in Form von Lastkollektiven darstellen. Insbesondere die absteigende Auftragung der Maximalamplitude über der Summenhäufigkeit der Schwingungen ist für weitere Untersuchungen hilfreich. Da in diesem Fall der Mittelwert der Schwingung nicht sichtbar ist, lässt sich auch eine Umrechnung aller Amplituden auf denselben Mittelwert vorschalten. Diese Amplitudentransformation erfolgt mithilfe des Haigh-Diagramms [8], wurde aber in den im Folgenden gezeigten Darstellungen nicht vorgenommen.

Kollektive lassen sich im Wesentlichen durch drei Größen beschreiben, anhand derer ein sehr einfacher Vergleich verschiedener Messungen möglich wird: Kollektivhöchstwert A_{\max} , Kollektivumfang H_0 und Kollektivform [6]. Insbesondere die Form des Kollektivs birgt eine wichtige Information, die aus der BZF in der Regel nicht abgelesen werden kann: Je voller das Rechteck aus A_{\max} und H_0 im Koordinatensystem ausgefüllt ist (Fläche unter der Kurve), desto größer ist die zu erwartende Bauteilschädigung durch dieses Kollektiv, da prozentual mehr Amplituden in der Nähe des Höchstwertes auftreten.

Bild 3(a) zeigt ein Beispiel, bei dem die Messergebnisse der Vertikalkraft F_z einer Fahrt auf Kopfsteinpflaster und einer Fahrt auf einer guten Straße in halblogarithmischer Auftragung gegenübergestellt sind. Die Maximalwerte der beiden Fahrten unterscheiden sich lediglich um 10%. Zusätzlich dazu ist aus der Form der Kollektive erkennbar, dass die Messfahrt auf der Kopfsteinpflasterstrecke trotz der etwa ein Drittel kürzeren Fahrzeit einen höheren Schädigungsinhalt aufweist.

Lastkollektive bieten weitere wesentliche Vorteile. Sie lassen sich einfach extrapolieren, wodurch ein Vergleich unterschiedlicher Belastungszustände gleicher Dauer möglich wird. Das in dieser Arbeit gewählte Vorgehen wird im Abschnitt 3.5 vorgestellt. Außerdem können unterschiedliche Kollektive zusammengefasst werden, indem ihre Schwingungsamplituden aneinandergereiht und in absteigender Amplitudenreihenfolge sortiert werden. In einer anschließenden Extrapolation lassen sich „Lebensdauerkollektive“ ableiten, die zum Beispiel im Bereich der Fahrzeugauslegung aus einer beliebigen Wichtung verschiedener Fahrzustände und einer definierten erwarteten Gesamtfahrzeit berechnet werden können, siehe Abschnitt 4.4. Das ist ein wesentlicher Vorteil für Untersuchungen der Betriebsfestigkeit. Ferner lassen sich aus solchen kombinierten Kollektiven wiederum repräsentative, kurze BZF ableiten, die Bauteilversuche mit großer zeitlicher Raffung ermöglichen. Demgegenüber wären bei einer Untersuchung der BZF im Frequenzbereich keine Lebensdaueruntersuchungen möglich, weil die Anzahl der Schwingungen nicht betrachtet wird.

3.4 Verwendung von Lastkollektiven in der Betriebsfestigkeit

Die rechnerische Lebensdauerabschätzung ist ein wichtiger Teil des Produktentwicklungsprozesses. Die Verwendung von Kollektiven aus Messdaten ist in diesem Zusammenhang sehr nützlich, weil sie mit starker Unsicherheit belegte Lastannahmen ersetzen. Grundlage der rechnerischen Lebensdauerabschätzung ist ein Vergleich der Beanspruchung mit der Beanspruchbarkeit. Zur Beurteilung der Beanspruchbarkeit kann beispielsweise eine Bauteilwöhlerlinie herangezogen werden.

In der Regel basiert die rechnerische Lebensdauerabschätzung auf der Berechnung einer Schadensakkumulation, bei der die Anzahl der zu erwartenden Schwingungen einer bestimmten Amplitude mit der angenommenen maximal möglichen Schwingungszahl dieser Amplitude gemäß der Wöhlerlinie ins Verhältnis gesetzt wird. Dieses Verhältnis ergibt die Bauteilschädigung für die jeweilige Amplitude. Eine Summierung der einzelnen Bauteilschädigungen für alle in einem Kollektiv enthaltenen Amplituden ermöglicht die Berechnung der Gesamtschädigung des Bauteils und eine Abschätzung der Lebensdauer. Für die Definition des Grenzwertes der Schädigung, bei dem ein Bruch erwartet wird, und für die Berücksichtigung kleiner Schwingungen existieren verschiedene Regeln. Dazu wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [6, 8, 9].

Grundlage der Lebensdauerabschätzungen sind Beanspruchungen, nicht Kräfte oder Momente. Aus diesem Grund ist vor der Lebensdauerberechnung eine Umrechnung der gemessenen Lasten in Beanspruchungen erforderlich. Im Bereich der Fahrwerksentwicklung kann diese Umrechnung beispielsweise mithilfe von Mehrkörpermodellen durchgeführt werden [5].

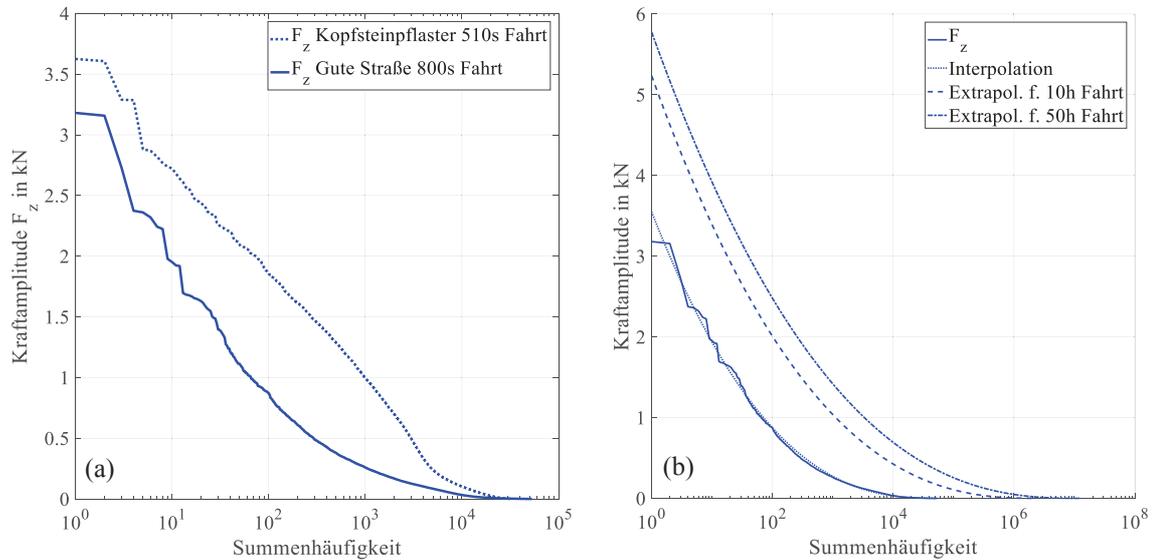


Bild 3: (a) Beispielkollektive für zwei unterschiedliche Fahrzustände, (b) Interpolation und Extrapolation auf unterschiedliche Fahrzeiten

3.5 Extrapolation der Messergebnisse auf längere Fahrzeiten

Interpolation

Für eine Umrechnung des Lastkollektivs auf längere oder kürzere Fahrzeiten ist zunächst die Beschreibung durch eine analytische Funktion sinnvoll. Dafür eignet sich nach [6] eine an die Gauß'sche Normalverteilung angelehnte Funktion³

$$H(x) = H_0 \cdot \exp(-\ln(H_0) \cdot x^2), \tag{Gl. 1}$$

mit dem Kollektivumfang H_0 , also der Anzahl der vollständigen Schwingspiele. Um die bei qualitativen Untersuchungen entscheidende Form der gemessenen Kollektive korrekt annähern zu können, wird ferner der Exponent als veränderlich betrachtet

$$H(x) = H_0 \cdot \exp(-\ln(H_0) \cdot x^\nu). \tag{Gl. 2}$$

Dieser Exponent ν wird als Formparameter bezeichnet [6]. Gl. 2 entspricht, von -1 bis 0 dargestellt, annähernd einem um 90° gedrehten Lastkollektiv mit einer normierten Maximalamplitude. In Anlehnung an Gl. 2 wurde ein Ansatz abgeleitet, mit dem die Interpolation in Form der in der Literatur üblichen Darstellungsweise wie bei dem Beispielkollektiv in Bild 3(a) angegeben werden kann. Dabei wurde ein Skalierungsfaktor μ für die korrekte Abbildung der gemessenen Maximalamplituden eingefügt und die Kurve um den Wert des kleinsten nach einer eventuellen Kollektivreduktion noch vorhandenen Datenpunkts a vertikal verschoben, damit die interpolierte Funktion und das (reduzierte) Kollektiv bei $x = H_0$ genau übereinanderliegen. Dementsprechend ergibt sich folgende Formel für die Interpolation

$$f(x) = \sqrt[\nu]{1 - \ln\left(\frac{e \cdot x}{H_0}\right)} \cdot \mu + a. \tag{Gl. 3}$$

Diese Funktion wird mithilfe der Parameter ν und μ so an die Messdaten angepasst, dass die quadratischen Abweichungen zwischen Interpolation und Messung minimiert werden, siehe Bild 3(b).

³ Gleichung der Gauß'schen Normalverteilung: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$

Extrapolation

Die Extrapolation erfolgt bezogen auf die Fahrzeit mit der Annahme, dass die Anzahl der Schwingspiele (Kollektivumfang) proportional zur Fahrzeitverlängerung steigt. Dabei muss die Tatsache, dass die höchsten zu erwartenden Belastungen bei relativ kurzen Messungen in der Regel nicht auftreten, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde eine Extrapolationsfunktion konstruiert, bei der die maximale Vergrößerung der Amplitude auf einen vorgegebenen Wert begrenzt wird. Demnach gibt es zwei Größen, die eingearbeitet werden müssen: Einen Extrapolationsfaktor f (Erhöhung des Kollektivumfangs) und einen Erhöhungsfaktor der Maximalamplitude E .

Die Maximalamplitude ($x = 1$) soll allein durch E beeinflusst werden, sie darf sich also bei einer Erhöhung des Kollektivumfangs nicht verändern. Das wird durch die Bedingung

$$\sqrt[\nu]{1 - \ln\left(\frac{e}{H_0}\right)} \cdot \mu + a = \sqrt[\nu]{1 - \ln\left(\frac{e}{H_0 \cdot f}\right)} \cdot \mu + a \rightarrow \sqrt[\nu]{\ln(H_0)} = \sqrt[\nu]{\ln(H_0 \cdot f)} \quad (\text{Gl. 4})$$

erreicht, aus der sich ein Vorfaktor der Extrapolationsfunktion $\frac{\sqrt[\nu]{\ln(H_0)}}{\sqrt[\nu]{\ln(f \cdot H_0)}}$ ergibt. Die extrapolierte Funktion $G(x)$ lautet somit

$$G(x) = E \cdot \sqrt[\nu]{\left(1 - \ln\left(\frac{e \cdot x}{f \cdot H_0}\right)\right)} \cdot \frac{\ln(H_0)}{\ln(f \cdot H_0)}. \quad (\text{Gl. 5})$$

Ferner wird der Erhöhungsfaktor E so definiert, dass er sich dem vorgegebenen Wert in Abhängigkeit des Extrapolationsfaktors f erst allmählich nähert, da das Auftreten der Maximalamplitude A_{max} über alle Zeiten bspw. bei Annahme einer doppelt so langen Messzeit noch nicht zu erwarten ist. Hierfür wurde eine geeignete von f abhängige Funktion in der Form

$$E = A_{max} - \frac{A_{max}^{-1}}{10 \sqrt[\nu]{f}}. \quad (\text{Gl. 6})$$

formuliert, die für $f = 1$ den Wert 1 annimmt und für $f \rightarrow \infty$ den Grenzwert A_{max} hat. Durch die Wurzelfunktion wird ein langsames Wachstum der Vergrößerungsfunktion E gewährleistet. Die Wahl des Wertes A_{max} erfolgt durch den Anwender und ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da sowohl unerwartete Ereignisse als auch Messergebnisse für höhere Geschwindigkeiten abgedeckt werden müssen. Die gewählten Werte sind in den Abschnitten 4.2 und 4.3 angegeben.

4. Auswertung der Messungen

4.1 Untersuchung statistischer Abweichungen

Mithilfe der Rainflow-Zählung werden zuerst Einzelmessungen für die verschiedenen Fahrzustände getrennt ausgewertet, um Mittelwerte und Standardabweichungen im Häufigkeitsbereich zu berechnen. In Bild 4 sind exemplarisch für die Fahrzustände Stadtverkehr, schlechte Straße bei 30 km/h (oben) und Stadtverkehr, gute Straße bei 50 km/h (unten) die Kollektive der einzelnen Messungen mit Editha der statistischen Auswertung gegenübergestellt. Die eingefärbten Bereiche zeigen ein Konfidenzintervall von $\pm 1.64\sigma$, das bei Annahme einer normalverteilten Größe 90% aller zu erwartenden Messwerte enthält. Die statistische Wiederholgenauigkeit ist als sehr gut zu bewerten, insbesondere ab einer Summenhäufigkeit von 10. Alle Ereignisse unterhalb dieser Schwelle finden so selten statt, dass große Streubreiten zu erwarten sind. Messungen weiterer Fahrzustände zeigen ähnliche Ergebnisse.

Im folgenden Abschnitt wird die Auswertung der Straßen-Messfahrten beschrieben. Anschließend wird auf die Sonderereignisse eingegangen, bevor schließlich im Abschnitt 4.4 die Ableitung von Lebensdauerkollektiven aus den Messdaten vorgestellt wird.

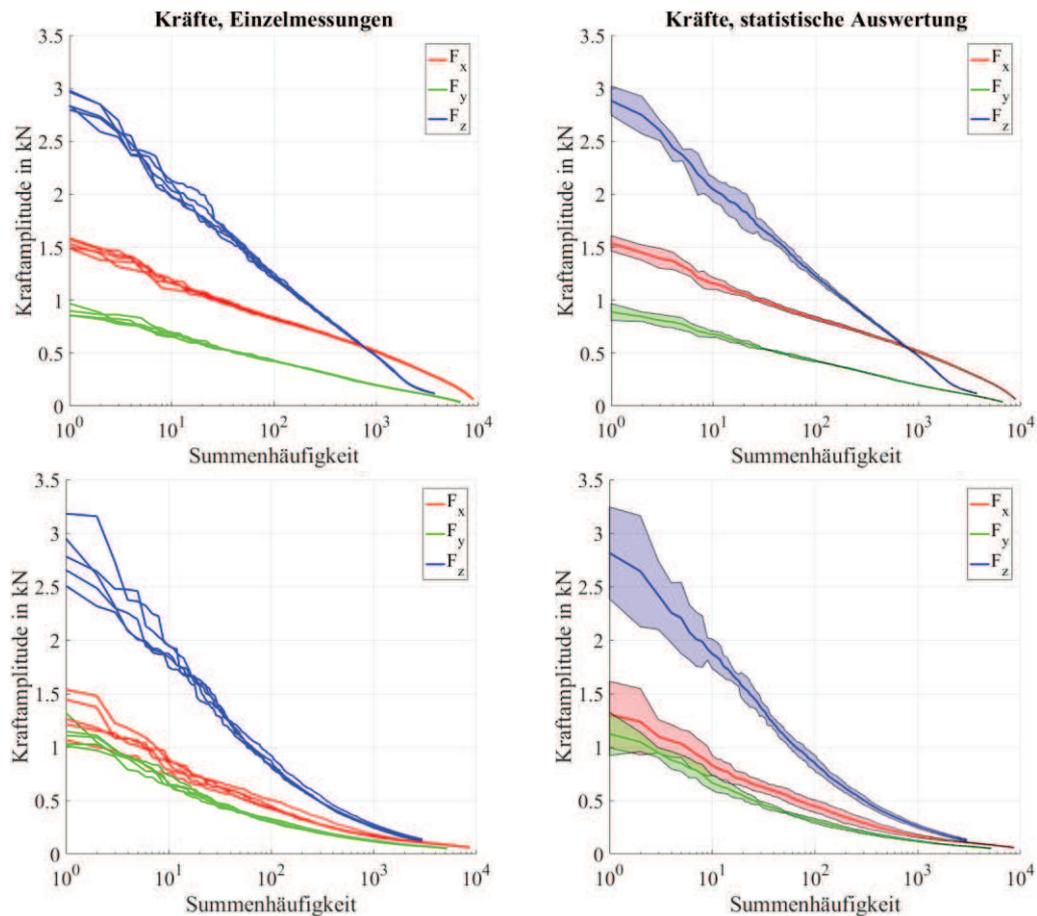


Bild 4: Statistische Abweichungen von Mehrfachmessungen. Oben: Stadtfahrt auf schlechter Straße, unten: Stadtfahrt auf guter Straße

4.2 Darstellung der Messergebnisse

Für weitere Analysen und die grafische Darstellung werden die Messungen vergleichbar gemacht, indem die aus den Mehrfachmessungen berechneten Mittelwerte für jeden Fahrzustand zunächst auf zwei Stunden extrapoliert werden. Durch dieses Vorgehen lassen sich Daten unterschiedlicher Fahrzustände und unterschiedlicher Fahrzeuge direkt vergleichen. Da die durchgeführten Messungen der Straßenfahrten eine statistisch abgesicherte Datenbasis darstellen, wird es als ausreichend angesehen, die maximale Amplitudenvergrößerung A_{\max} auf das 2,5-fache der gemessenen Werte festzulegen. Bild 5 zeigt einen Vergleich der Messergebnisse zwischen den Fahrten mit Editha (durchgezogene Linie) und den Fahrten mit dem herkömmlich motorisierten Smart (Strichlinie) für die verschiedenen Fahrzustände.

Die Fahrten auf Kopfsteinpflaster (a) sind die einzigen, bei denen die Belastungskollektive eine geradlinige oder konvexe Form haben. Je stärker diese Form ausgeprägt ist, desto größer ist der Anteil hoher Amplituden in der aufgenommenen BZF. Ferner weisen diese Kollektive auch die höchsten Amplituden aller Fahrzustände auf, womit die Messdaten eindeutig zeigen, dass bei der Fahrt auf schlechter Straße die größten Belastungen auftraten. Im Gegensatz dazu traten bei den Überlandfahrten (d) weder große Straßenunebenheiten noch Kurven oder Abschnitte mit starker Beschleunigung auf. Dementsprechend wurden hier die geringsten Belastungsamplituden aufgezeichnet. Die in (a) und (c) dargestellten Messergebnisse für die Stadtfahrt auf guter Straße und die Fahrt auf kurviger Landstraße unterscheiden sich nicht wesentlich. Allgemein lässt sich die Aussage ableiten, dass Straßenzustand und Streckenführung einen größeren Einfluss auf die auftretenden Belastungen haben als die gefahrene Geschwindigkeit.

Die Reihenfolge der Kraftamplituden ist bei allen Fahrzuständen gleich. Die vertikale Kraft F_z (blau) zeigt die höchsten Amplituden, gefolgt von der von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen dominierten Fahrzeuglängskraft F_x (rot). Die niedrigsten Amplituden wurden während der durchgeführten Messfahrten bei der Fahrzeugquerkraft F_y erfasst. Selbst bei den Messungen auf kurviger Landstraße ist die Reihung unverändert, der Effekt von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen ist demnach größer.

Aus den Kollektiven ist klar erkennbar, dass Editha die höheren Radlasten aufweist. Das trifft insbesondere auf die Vertikalkraft F_z und die Querkraft F_y zu. Bei der Längskraft F_x werden aufgrund der höheren Motorleistung

des Standard-Smarts in einem Fall etwas höhere Maximalamplituden gemessen, bei einer Mittelung der Amplituden zeigt sich jedoch auch hier eine geringfügige Tendenz zu höheren Radlasten bei höherer Fahrzeugmasse (siehe Tab. 2). Da die Vertikalkraft auf Straßenunebenheiten am stärksten reagiert, zeigen sich hier die höchsten Amplituden.

Für einen quantitativen Vergleich werden die Mittelwerte der gezeigten Lastkollektive berechnet und in Tab. 2 zusammen mit den relativen Abweichungen der Messungen bezogen auf den herkömmlichen Smart dargestellt. Damit geringe Amplituden in diesem Mittelwert nicht überrepräsentiert sind, werden die in Bild 5 gezeigten Verläufe mit einer definierten Anzahl von Punkten in logarithmischem Abstand versehen, anhand derer die Kollektivmittelwerte berechnet werden. Folgende Unterschiede ergeben sich: Die Längskraft erhöht sich bis zu 14% im Vergleich zu den Messwerten mit dem konventionellen Smart, die Querkraft um 24%-41% und die Vertikalkraft um 18%-51%. Bei den Fahrten auf schlechten Untergründen sind die Unterschiede zwischen herkömmlichem und umgerüstetem Smart größer. Sowohl Tab. 2 als auch Bild 5 bestätigen damit eindeutig, dass die Umrüstung auf Elektroantrieb zu einer deutlichen Erhöhung der Radlasten führt. Da jedoch sowohl die ungefederte Masse als auch die gefederte Masse bei Editha im Vergleich zu dem originalen Smart erhöht sind, kann allein aufgrund der vorliegenden Messdaten ohne zusätzliche Untersuchungen der jeweilige Einfluss auf die Erhöhung der Radlasten nicht bestimmt werden.

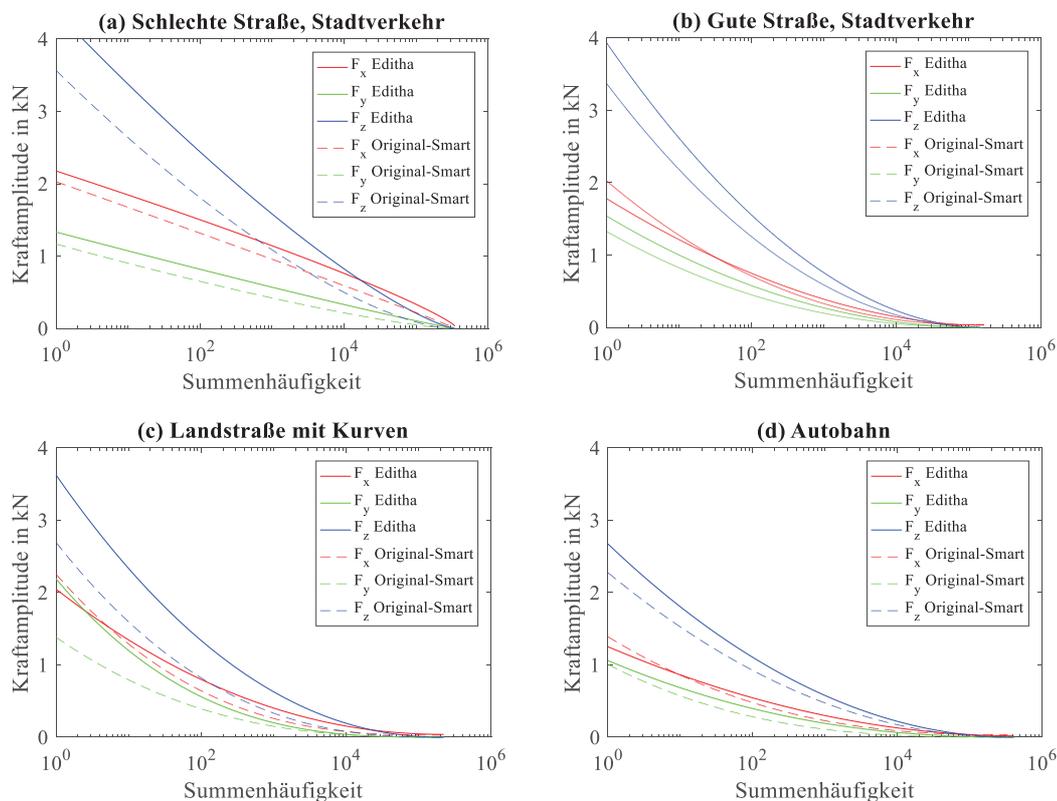


Bild 5: Auf 2 h extrapolierte Lastkollektive für die unterschiedlichen Fahrzustände

Tab. 2: Vergleich der Mittelwerte der von den in Bild 5 dargestellten extrapolierten Lastkollektive

Fahrbahn		F_x	F_y	F_z
Stadtverkehr, gute Str.	Mittelwert Originalsmart	0.650	0.410	1.108
	Mittelwert Editha	0.652	0.514	1.360
	Relative Abweichung	+0.3%	+25.2%	+22.7%
Stadtverkehr, schlechte Str.	Mittelwert Originalsmart	1.049	0.512	1.434
	Mittelwert Editha	1.196	0.638	1.900
	Relative Abweichung	+14.0%	+24.5%	+32.5%
Landstraße mit Kurven	Mittelwert Originalsmart	0.628	0.378	0.769
	Mittelwert Editha	0.693	0.532	1.161
	Relative Abweichung	+10.4%	+40.5%	+51.0%
Autobahn	Mittelwert Originalsmart	0.423	0.263	0.758
	Mittelwert Editha	0.439	0.328	0.891
	Relative Abweichung	+3.7%	+24.7%	+17.6%

4.3 Sonder- und Missbrauchereignisse

Eine besondere Belastung für Fahrzeuge stellen selten auftretende Sonder- und Missbrauchereignisse dar. Es ist sehr wichtig, diese in der Auslegung zu berücksichtigen, um generell sicheres Fahrverhalten und im Notfall ein Bauteilversagen ohne Insassengefährdung zu gewährleisten. Gleichzeitig ist es jedoch selbst mit Zugriff auf sehr robuste und zuverlässige Messtechnik nicht möglich, alle Sonderereignisse mit vertretbarem Materialeinsatz zu messen. Nicht jede Fahrsituation lässt sich künstlich herbeiführen und vor allem ist das Versagen einzelner Bauteile nach mehrmaligen extremen Belastungen sehr wahrscheinlich. Aus diesem Grund muss das Messprogramm an dieser Stelle eingeschränkt werden. Es ist jedoch möglich, Referenzmessungen bei langsamen Geschwindigkeiten durchzuführen und als Basis weiterer Untersuchungen zu verwenden. Eine Möglichkeit ist es, zu diesem Zweck Lastkollektive zu verwenden, die mit einem höheren Grenzwert der Amplituden A_{\max} (vgl. Gl. 6) extrapoliert werden.

Dafür wurde die Überfahrt folgender Unebenheiten erfasst:

- Zwei verschiedene Bodenwellen (Länge: 55 cm, Höhe 6 cm bzw. 10 cm); 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h
- Bordstein (Höhe: 8 cm), 10 km/h
- Schlagloch (Länge ca. 70 cm, Tiefe ca. 5 cm), 10 km/h

Es wurden Mehrfachmessungen durchgeführt, ferner wurden die Messstellen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten überfahren. Analog zu den vorherigen Auswertungen erfolgt die Darstellung in Form von Lastkollektiven. Dafür wurden aus den Mehrfachmessungen Mittelwertkollektive gebildet und für die Auswertung aneinandergereiht⁴. Die dafür verwendeten BZF enthalten nur die Messdaten für die Sonderereignisse selbst, irrelevante Fahranteile wurden entfernt. Da bei der Betrachtung von Sonderereignissen nur große Kraftauschläge von Bedeutung sind, wurden bei der Interpolation alle Amplituden vernachlässigt, die kleiner als 33% des Maximalwertes sind. Die so erzeugten Kollektive sind in Bild 6(a) und (b) dargestellt.

Eine Extrapolation auf 2 h wie bei den im vorangegangenen Abschnitt gezeigten Messungen ist bei der Untersuchung der Sonderereignisse nicht sinnvoll, da die gemessenen Kollektive lediglich eine Fahrtzeit von etwa 30 s repräsentieren. Stattdessen wurde ein konstanter Faktor $f=100$ für die Extrapolation gewählt, deren Ergebnisse in Bild 6(c) dargestellt sind. In weiteren Messungen wurde beobachtet, dass bei der Überfahrt von Unebenheiten mit steigenden Geschwindigkeiten aufgrund der Reifenverformung ein Maximum erreicht wird und keine höheren Vertikalkräfte mehr auftreten. Demnach existiert eine Grenze für die maximale Amplitudenvergrößerung, weshalb es als ausreichend erachtet wird, die maximale Vergrößerung der Amplituden auf $A_{\max} = 4$ festzulegen. Es sei jedoch erneut darauf hingewiesen, dass dieser Vergrößerungsfaktor mit Unsicherheit belegt ist, insbesondere, wenn sämtliche Missbrauchereignisse abgedeckt werden sollen, die teilweise deutlich andere Belastungen hervorrufen.

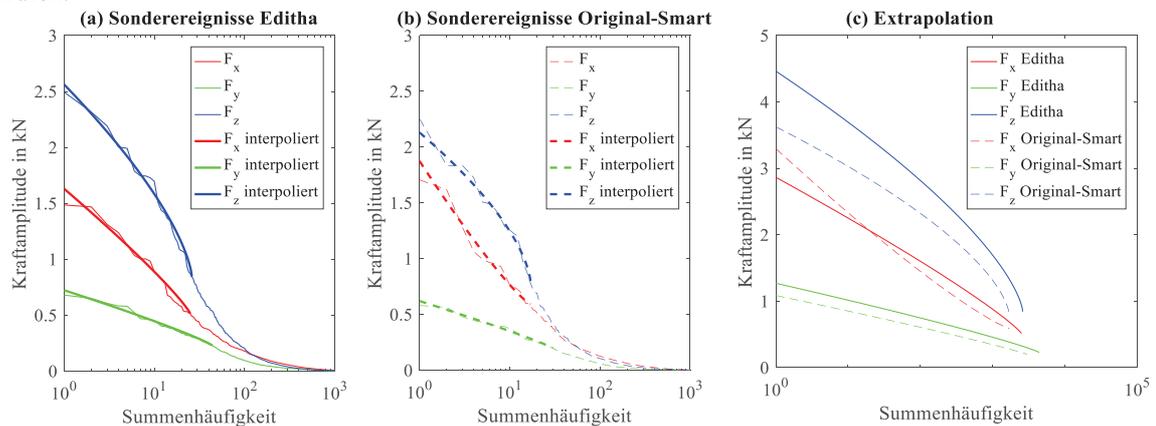


Bild 6: Gemessene und interpolierte Kollektive der Sonderereignisse, (a) Editha, (b) Original-Smart, (c) Extrapolation für $F = 100$

In Bild 6 ist zu erkennen, dass die Fahrzeuglängskraft F_x bei dem nicht umgerüsteten Smart 13% größere Maximalauschläge als bei Editha aufweist. Das ist unerwartet, weil die zugrundeliegenden Messdaten kein Abbremsen oder Beschleunigen des Fahrzeugs enthalten. Bei einer genaueren Analyse der Messdaten zeigt sich, dass diese Unterschiede auf die Messungen der Bordsteinüberfahrt zurückzuführen sind. Bei den Fahrten mit dem originalen Smart wurde dabei mit geringfügig höheren Geschwindigkeiten gefahren als bei den Messungen mit Editha. Of-

⁴ Insgesamt fünf Ereignisse: Schwelle bei versch. Geschwindigkeiten, Bordstein- und Schlaglochüberfahrt.

fenbar reagiert die Fahrzeuglängskraft beim Überfahren von senkrechten Hindernissen stärker auf die Fahrzeuggeschwindigkeit als die Fahrzeugvertikalkraft. Generell ist zu konstatieren, dass sich im Vergleich zu den Messfahrten aus Abschnitt 4.2 im Bereich der Fahrzeuglängskraft die größten Unterschiede der Kollektive zeigen. Weder Quer- noch Vertikalkraft zeigen in diesem Vergleich deutlich unterschiedliche Verläufe oder Maximalauschläge.

4.4 Ableitung repräsentativer Lebensdauerkollektive

Zur Abschätzung der zu erwartenden Belastungen während der gesamten Fahrzeuglebensdauer werden die durchgeführten Messungen im Folgenden kombiniert. Es wird eine Gesamtlebensdauer von 250 000 km zugrunde gelegt, was bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 50 km/h einer Fahrzeit von 5000 h entspricht. Die Aufteilung dieser Fahrzeit auf die unterschiedlichen Fahrzustände erfolgt gemäß dem im Car Loading Standard (CARLOS, [10]) festgelegten Einsatzprofil, das in einer Zusammenarbeit mehrerer Fahrzeughersteller mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt entstand. Dieses Profil sieht die im Folgenden angegebene Aufteilung vor, die auf Basis der vorliegenden Datenbasis modifiziert wurde.

- 30% Autobahn	30% gute Landstraße ohne Kurven	1500 h
- 29% Gute Landstraße	14.5% Landstraße mit Kurven, 14.5% Landstraße ohne Kurven	725 h 725 h
- 23% Stadtverkehr	23% Stadtverkehr, gute Straße	1150 h
- 14% Schlechte Landstraße	14% Stadtverkehr, schlechte Straße	700 h
- 4% Schlechtwegstrecke	Sonderereignisse	400 h

Diesen Angaben entsprechend wurden die Messungen der verschiedenen Fahrzustände extrapoliert und zusammengeführt. Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt Bild 7. Aufgrund der langen angenommenen Fahrzeit ergeben sich sehr hohe Gesamtschwingungszahlen im Bereich $H_0 = 1,5 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^8$. Der qualitative Verlauf der Lastkollektive ähnelt den Ergebnissen in Bild 5. Abgesehen von wenigen Einzelereignissen der Längskraft F_x sind nach der Umrüstung durchgängig höhere Schwingungspielamplituden zu erwarten. Die Vertikalkraft F_z ist absolut dominierend und wird stark durch die Fahrten auf schlechter Straße beeinflusst, sodass sich für beide Fahrzeuge bei dieser Kraft eine Geradlinienverteilung einstellt.

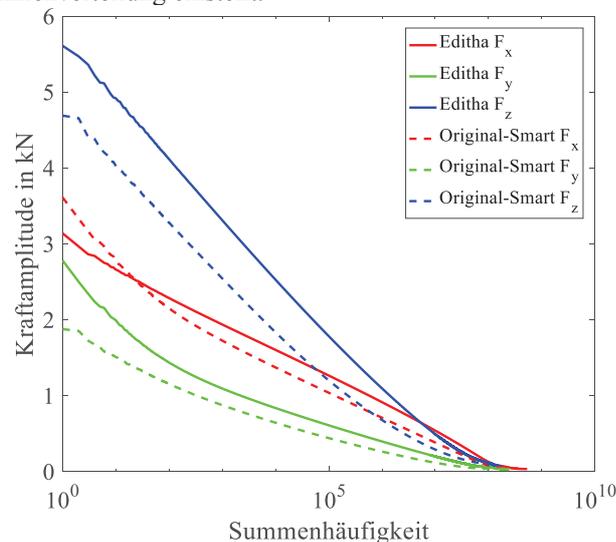


Bild 7: Darstellung der angenommenen Gesamtlebensdauerkollektive für Editha und den originalen Smart.

5. Diskussion und Fazit

Die in diesem Artikel gezeigten Auswertungen basieren bis auf zwei Ausnahmen auf Messungen, die mindestens fünfmal wiederholt wurden und daher statistisch ausreichend abgesichert sind. Die Ausnahmen sind die Überlandfahrt auf gerader Strecke mit Editha, bei der nur eine Messung aufgezeichnet wurde, die allerdings mit 900 s Messzeit deutlich länger als jede andere Einzelmessung ist. Außerdem wurde die Fahrt auf kurviger Landstraße mit dem originalen Smart nur einmal durchgeführt. Das ist eine mögliche Begründung für die starken Abweichungen zwischen den beiden Fahrzeugen, die bei diesem Fahrzustand registriert wurden und in Bild 5(c) dokumentiert

sind. Insbesondere hinsichtlich der Fahrzeugquerkraft F_y wären bei Mehrfachmessungen eventuell kleinere Abweichungen aufgetreten, was auch eine Änderung der in Bild 7 gezeigten Lebensdauerkollektive bewirkt hätte. Bei den Lebensdauerkollektiven hat insbesondere der Faktor A_{\max} für die Amplitudenvergrößerung einen sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse. Für eine bessere Absicherung der gewählten Werte wäre ein deutlich umfangreicheres Messprogramm mit längeren Messzeiten und einer stärkeren Variation der Geschwindigkeiten notwendig. Die Sonderereignisse sollten durch gezielte Beschleunigungs- und vor allem Bremsvorgänge erweitert werden. Bei Sonder- und Missbrauchereignissen besteht das grundsätzliche Problem, dass nicht jeder Fahrzustand mit vertretbarem Materialaufwand gemessen werden kann. Dadurch ergeben sich weitere Unwägbarkeiten hinsichtlich der Lebensdauerkollektive. Die mit der Rainflow-Zählung ermittelten Schwingungszyklen, aus denen die Darstellung der Lastkollektive abgeleitet wird, wurden nicht auf gleiche Mittelwerte umgerechnet. Beispielsweise für eine spätere Ableitung von repräsentativen BZF wäre das allerdings sinnvoll.

Der Vergleich der Messdaten zeigt dennoch zweifelsfrei, dass bei Editha höhere Radlasten auftreten. Es ist daher mit einer Verkürzung der Gesamtlebensdauer der Fahrwerkskomponenten zu rechnen. Wesentliche Unsicherheit besteht in der Frage, wie groß der Anteil der Erhöhung der Radlasten aufgrund des Anstiegs der ungefederten Masse ist. Angesichts der Leergewichtszunahme im Zuge der Umrüstung um etwa 220 kg kann von einem signifikanten Einfluss der erhöhten gefederten Masse ausgegangen werden. Dennoch bedeutet diese Arbeit einen Erkenntnisgewinn für die Weiterentwicklung und präzisere Auslegung des Radnabenmotors im Projekt CoMo. Auf Basis der Messdaten lassen sich deutlich genauere Lastannahmen treffen, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Ausfalls entscheidend reduziert wird.

Eine Ergänzung der Messungen durch Mehrkörpersimulationen wäre sinnvoll, um einerseits auch Aussagen über nicht messbare Lastfälle, beispielsweise die Überfahrt von Hindernissen bei hohen Geschwindigkeiten, oder Variationen der Lastkollektive für unterschiedliche ungefederte Massen und Gesamtfahrzeugmassen zu treffen. Ferner ist eine Abbildung der Fahrwerkskinematik in einem Berechnungsprogramm sinnvoll, um aus den gemessenen Lastkollektiven konkrete Beanspruchungskollektive für die einzelnen Fahrwerkslenker zu bestimmen, die die Basis für Lebensdauerberechnungen darstellen. Eine Kombination von Messfahrten mit derartigen Berechnungen ermöglicht sehr detaillierte Untersuchungen sowohl hinsichtlich der rechnerischen Lebensdauerabschätzung als auch der experimentellen Lebensdauerbestimmung, indem aus den berechneten Lastkollektiven BZF mit einer größtmöglichen zeitlichen Raffung abgeleitet werden. Mithilfe der flexiblen und robusten Messtechnik sind darüber hinaus auch Untersuchungen in anderen Forschungs- und Produktentwicklungsgebieten möglich.

6. Danksagung

Das Leitvorhaben Competence in MObility - COMO III wird im Rahmen des Operationellen Programms aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Sachsen-Anhalts (ZS/2016/04/78118) gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.automotive.ovgu.de/Projekte/Competence+in+Mobility.html>, zul. aufgerufen am 21.06.2017
- [2] http://www.editha.ovgu.de/Projekte/Editha+I_0-p-38.html, zuletzt aufgerufen am 21.06.2017
- [3] CAEmax WFT Datenblatt, http://www.caemax.de/download/prod-de/sensoren/wft/Datenblatt_CAE-MAX_Messrad_WFT-Cx.pdf, zuletzt aufgerufen am 07.07.2017
- [4] Daniel, C. et. al.: Konstruktion, Berechnung und experimentelle Belastungsmessung des Antriebsstranges von „Editha“, 2013, Tagungsband 10. Magdeburger Maschinenbau-Tage
- [5] Heißing, B., Ersoy, M., Gies, S.: Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, SpringerVieweg Wiesbaden, 2013
- [6] Köhler, M., Jenne, S., Pötter, K., & Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [7] Dowling, M.E.: Fatigue failure predictions for complicated stress-strain-histories. J. of Mats. 7 (JMLSA), 71–87 (1972)
- [8] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [9] Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit – Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile, Verlag Stahleisen mbH Düsseldorf, 1992
- [10] Schütz, D., et al.: Standardisierte Lastabläufe für Bauteile von PKW Radaufhängungen, LBF-Bericht 191, 1990