

Typspezifische Bemessungslasten für die Raderprobung mit Hilfe von GPS-basierten Datenmodellen

R. Heim, S. Weingärtner, M. Braun[✉], T. Lenhart[†]
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
MAGNUM Automatisierungstechnik GmbH[✉]
Mechanical Simulation – European Technical Support Office[†]

Zusammenfassung

Der experimentelle Nachweis der Betriebsfestigkeit von Rädern und Naben erfolgt zunehmend mit den Verfahren der Zweiaxialen Räderprüfung (ZWARP). Die hierbei methodenspezifischen Merkmale sind:

- Wirkungsrichtung der äusseren Kräfte analog zur Belastung im Radaufstandspunkt
- Zeitvariante Lasten in einem Blockprogramm zur Abbildung quasistochastischer Anregungsmechanismen

Speziell für den zweiten Punkt sind in der Vergangenheit verschiedene Lastprogramme entwickelt worden, die zu entsprechenden Referenzstrecken äquivalente Beanspruchungskollektive darstellen. Beispielsweise wurden die standardisierten Lastprogramme »Europazyklus« teilweise auf Basis von Fahrbetriebsmessungen auf der Nordschleife des Nürburgrings entwickelt und mit Hilfe der statischen Radlasten in eine Normalenform überführt.

Die seit einigen Jahren festzustellende Tendenz der Entwicklung von Plattformkonzepten und damit einer steigenden Anzahl von Karosseriederivaten verlangt zunehmend nach typspezifischeren Bemessungslasten auch für Komponenten wie Räder, Naben und Radlager.

Die Anpassung des in Normalenform für eine Radlast von 425 kg abgestimmten Lastprogramms »Europazyklus PKW« kann mit Hilfe von GPS-basierten Datenmodellen sehr typspezifisch erfolgen und damit einen wichtigen Beitrag zu einer weiter verbesserten Simulationsgüte im Rahmen der Zweiaxialen Radprüfung darstellen. Die im Fahrbetrieb aufgezeichneten GPS-Vektoren werden dabei zur Abbildung einer virtuellen Fahrt in der Simulationssoftware CarSim® eingesetzt. Die für diese Untersuchung in CarSim® ausgewählten Fahrzeugmodelle orientieren sich an den Merkmalen der Zielfahrzeuge für die Entwicklung der drehenden Komponenten. Aufgrund der auf die Belange der Fahrdynamik optimierten Komplexität der Fahrzeugmodelle in CarSim® lassen sich für die Zielfahrzeuge erwartete oder abgeschätzte Toleranzbereiche im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung (DoE) berücksichtigen und damit typspezifische Bemessungslasten und -kollektive entwickeln.

Das hier beschriebene Verfahren erlaubt eine verbesserte Anpassung der relevanten Steuerparameter von standardisierten Lastprogrammen und gewährleistet damit einen Beitrag zur Entwicklung typspezifischer experimenteller

ZWARP-Prüfungsumgebungen.

Stichwörter

Bemessungslasten, GPS-Datenmodelle, MKS, Zweiaxiale Raderprobung

VEHICLE TYPE SPECIFIC DESIGN LOADS FOR THE WHEEL DURABILITY PROCESS USING GPS-BASED SIMULATION MODELS

Abstract

Since early 1980's the BiAxial Wheel Fatigue test has been developed to an established standard for lab based simulation. Compared to other procedures the BiAx Wheel Fatigue test has advantages by using the complete tire-wheel assembly as well as realistic loadtime histories which were derived from vehicle RLD. This paper is dealing with the process of generating vehicle type specific load files using GPS data for track and vehicle speed. By means of CarSim® multi-body-dynamics the major vehicle parameter can be varied in an DoE mode that is used to simulate time-histories for the track data in an offline simulation process.

Hence it is possible to create vehicle specific virtual RLD which can be used to adjust the load file parameter for lab based service load simulation more appropriately than ever.

Keywords

Service load simulation, assembly, rotating components, BiAxial Wheel Fatigue Test

Einleitung

Die grundsätzliche Gestaltung von Fahrzeugrädern als Scheibenrad mit den beiden Konstruktionselementen Felge und Radscheibe erlaubt für den Betriebsfestigkeitsnachweis die Reduzierung der im Reifenlatsch wirkenden Kräfte auf die vertikale und horizontale Richtung. Dementsprechend hat sich mit der sog. Zweiaxialen Räderprüfung (ZWARP) ein Verfahren für den vollständigen Betriebsfestigkeitsnachweis durchgesetzt, das fahrphysikalisch relevante Radlastkombinationen in einer laborgestützten Prüfeinrichtung für die zeitgeraffte Betriebslastensimulation umsetzt [1].

Im Zusammenwirken von Prüfeinrichtung und Lastprogramm entsteht eine komplexe und realitätsnahe Simulationsumgebung für den experimentellen Festigkeitsnachweis, der

- die Wirkungsrichtung der äusseren Kräfte analog zur Belastung im Radaufstandspunkt sowie
- die zeitvariante Lasthistorie zur Abbildung quasistochastischer Anregungsmechanismen

berücksichtigt.

Speziell für die Zeitreihen der Radkräfte bzw. der in der Prüfeinrichtung wirksamen Zylinderkräfte zur Simulation der Beanspruchung im Rad ergibt sich die Anforderung nach einem generalisierten, einfach parametrierbaren Lastprogramm für eine zu Rad und Fahrzeug adäquate Betriebslastensimulation. Die in der Vergangenheit, überwiegend auf Basis von Fahrbetriebsmessungen entwickelten LBF-Lastfallbibliotheken sind auch für moderne Fahrzeug- und Fahrwerkskonzepte weitgehend abgesichert und gelten als bewährt und besonders anwenderfreundlich. Diese Lastfallbibliotheken sind in einfacher Weise auf die statische Radlast normiert und können deshalb sehr schnell auf einen fahrzeugtypischen Bemessungsumfang umgerechnet werden.

Mit dem Ausbau von PKW-Plattformkonzepten ergeben sich zunehmend unterschiedliche Fahrzeugderivate innerhalb der gleichen Größen- und Gewichtsklasse: Stufen- und Schrägheckfahrzeuge, Coupés, Vans, SUV oder Cabriolets. Bedingt durch diese Gestaltungsvielfalt ergeben sich teilweise unterschiedliche Fahrzeugmerkmale, die einen größeren Einfluss auf die Beanspruchung von Fahrwerksbauteilen haben können als dies allein durch die statische Radlast ausgedrückt wird.

Mit der Anwendung moderner numerischer Verfahren sowie im Fahrzeugbetrieb aufgezeichneter Orts- und Geschwindigkeitsdaten wurden am Fraunhofer LBF Konzepte entwickelt, die Bemessungsannahmen für die Rädererprobung spezifischer auf bestimmte Fahrzeug- und Plattformmerkmale auszurichten. Auswahl und Anwendung geeigneter Softwareprodukte für eine echtzeitfähige Mehrkörpersimulation wurde hierbei durch die MAGNUM Automatisierungstechnik GmbH sowie durch Mechanical Simulation Corp. unterstützt.

Gegenüber dem Einsatz von Messrädern oder Radlastsensoren direkt am Fahrzeug kann das hier vorgestellte Konzept als »Offline-Lastdatengenerierung« beschrieben werden, das aufgrund des kostenseitig geringen Aufwands auch für Langzeituntersuchungen durchaus tauglich ist.

Zur Beanspruchung drehender Komponenten

In der Fahrzeugdynamik wird zwischen Längs-, Quer- und Vertikaldynamik unterschieden, was die vollständige Physik bei Fahrwegverfolgung und -störung beschreiben hilft. Dabei sind mit der Fahrwegverfolgung alle Manöver assoziiert, die für eine an Strecke und Verkehr angepasste Fahrt vom Start zum Ziel notwendig sind. Damit impliziert die Definition der »angepassten Fahrt« die gesamte Regelstrecke von Fahrweg, Fahrzeug und Fahrer unter Berücksichtigung regulärer Verkehrsverhältnisse sowie

einem idealgeometrischen Fahrweg [Bild 1]. Hiervon ausdrücklich ausgenommen sind unfallartige Fahrmanöver, die den Sonder- bzw. Mißbrauchslasten zuzuordnen sind und hier nicht betrachtet werden.

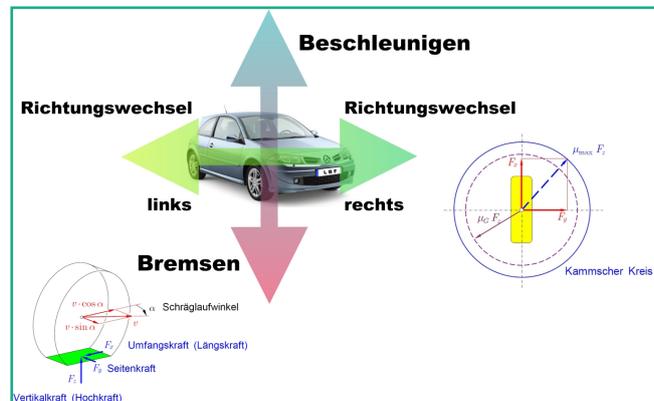


Bild 1. – Belastungen am Rad bei der Fahrwegverfolgung

Die aus Fahrwegstörungen resultierenden Anregungsmechanismen überlagern sich den Beanspruchungen aus der Fahrwegverfolgung. Aufgrund der von idealgeometrischen Verhältnissen abweichenden Makrostruktur bzw. Unebenheiten des realen Fahrwegs ergeben sich Zusatzkräfte mit ausgesprochen transientspezifischer Charakteristik, die zur Grundbeanspruchung aus der Fahrwegverfolgung überlagerte, oftmals höherfrequente Beanspruchungen mit zufälliger Phasenlage erzeugen.

Für die Betriebsfestigkeit von Scheibenrädern, die in unterschiedlicher Gestaltung und Ausführung für die überwiegende Anzahl von PKW und Nfz Anwendung finden, ist es nicht zwangsläufig erforderlich die Fahrzeuglängsdynamik zu berücksichtigen: Die im Reifenlatsch wirksamen Umfangskräfte beim Beschleunigen bzw. Bremsen sind in ihrer Größenordnung von untergeordneter Bedeutung für die Strukturfestigkeit von Felge und Radscheibe [2]. Dies gilt allerdings nicht für die Betrachtung des in horizontaler Richtung am Reifen zur Verfügung stehenden Kraftschlusspotentials: Hier ist eine im Regelfall gleichzeitig wirksame Umfangskraft ein limitierender Faktor für die Reifenseitenkraft. Deshalb ist es für die Betriebslastensimulation in der Rädererprobung unbedingt erforderlich, die fahrphysikalisch begründeten Zusammenhänge zwischen Umfangs- und Seitenkraft zu berücksichtigen. Ein unter Schräglauf – und damit unter seitlichem Schlupf ablaufender Reifen kann ein in horizontaler Richtung wirksames Kraftschlusspotential aufbauen, das durch die Radlast – also die normal zur Fahrbahnoberfläche wirksame Kraft – und den Reifenschräglaufwinkel beeinflusst wird. Der Aufbau moderner PKW-Reifen sowie die Haftungsbedingungen auf üblichen Fahrbahnoberflächen begrenzen die Horizontalkraft F_h mit der tatsächlich wirksamen Vertikalkraft auf $F_{h,max} \leq 0,95 \cdot F_{v,max}$. Dieser Zusammenhang ist

allerdings nur dann gültig, wenn sich im Reifenlatsch keine weitere Kraftkomponente mehr aufbaut. Die bei einer gegebenen Radlast mögliche Horizontalkraft verringert sich immer dann, wenn sich gleichzeitig eine Umfangskraft – also eine aus Beschleunigung oder Verzögerung resultierende, zusätzliche Kraftkomponente ergibt. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand des sog. Kamm'schen Kreises gut darstellen; tatsächlich ist die Grenzkurve zu meist kein richtiger Kreis, da der maximale Kraftschlussbeiwert in Umfangsrichtung im Regelfall größer ist als der Seitenkraftbeiwert β .

Die zweite, für die Betriebsfestigkeit von Rädern maßgebliche Kraftkomponente ist die Vertikalkraft – im einfachsten Fall, nämlich bei der unbeschleunigten Fahrt auf weitgehend ebener Fahrbahn entspricht dies weitgehend der Größenordnung der statischen Radlast. Aufgrund von Fahrwegstörungen – also beispielsweise schwellen- oder schlaglochartigen Anregungsmechanismen – ergeben sich gegenüber der statischen Radlast teilweise beträchtliche Stossfaktoren. Neben der Makrotextur des Fahrwegs sind hierfür vor allem die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die Reifensteifigkeit $c_{T,v}$ die maßgeblichen Parameter. Eine hierfür näherungsweise gültige empirische Beschreibung mit einem Faktor für die Fahrwegunebenheit k_R ist $\{4\}$:

$$n_v = 1 + \frac{k_R [cm] \cdot c_{T,v} [kN/cm]}{F_v [kN]}$$

Ein für Autobahnen und Schnellstraßen zutreffender Fahrwegunebenheitsfaktor ist $k_R \approx 1,3$; für Schlechtwegstrecken wird $k_R^* \approx 2,6^{+0,5}$ und für Geländestrecken kann sogar $k_R^{**} \approx 3,5$ erwartet werden.

In dem allgemeinen Fall einer Schlechtweganregung werden nicht nur in vertikaler, sondern gleichzeitig auch in horizontaler Richtung signifikante Kräfte wirksam sein; dies lässt sich auf eine Kombination aus Kraft- und Formschluss beim Abrollen des Reifens auf einer unebenen Fahrbahnoberfläche zurückführen. Während die aus Fahrwerk und Fahrweg resultierenden Querkräfte beim Fahren auf Schnellstraßen nur eine Größenordnung von bis zu 25% der statischen Radlast erreichen, können bei Straßen in Normalqualität (Bundes- und Landstraßen) schon bis zu 40% und bei echten Schlechtwegstrecken bereits 75% der statischen Radlast als Querkraft wirken $\{Bild\ 2.\}$.

Lastprogramme in der Raderprobung: Diese grundsätzlich und in ihrer Größenordnung seit langer Zeit bekannten Zusammenhänge werden nicht zuletzt in den LBF-Lastfallbibliotheken für die Ableitung standardisierter Lastprogramme genutzt. Damit lassen sich z.B. die globalen Steuerparameter von in der Laborprüfung eingesetzten Lastprogrammen wie »Europazyklus« auf die individuelle statische Radlast des jeweiligen Fahrzeugs anpassen.

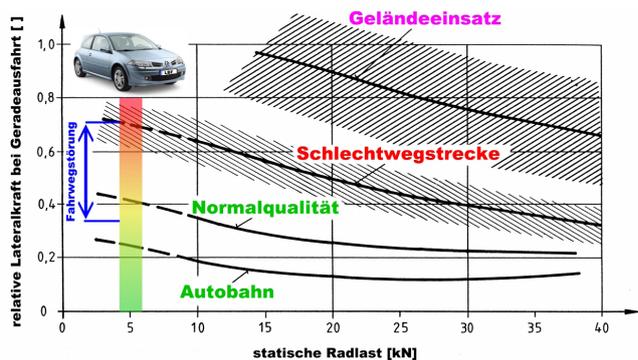


Bild 2 - Querkräfte aus Fahrwegstörung bei Geradeausfahrt

In dieser Weise ist es möglich, bereits in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses – und ohne expliziten Zugriff auf im Fahrbetrieb gemessene Radkräfte ein für die Laborprüfung gültiges Lastprogramm zur Betriebslastensimulation zu entwickeln $\{5.\}$. Kernpunkte hierfür sind die aus den LBF-Lastfallbibliotheken $\{Bild\ 3.\}$ ausgelesenen »fahr-dynamischen Grenzlaster« bei Schlechtwegstrecke bzw. Kurvenfahrt sowie Umfang und Form der mit diesen Fahrwegzuständen assoziierten Teilkollektive.

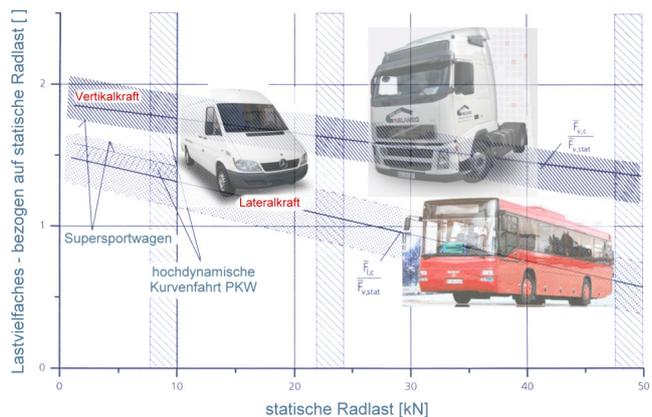


Bild 3. – LBF-Lastfallbibliothek (Fahrzeugquerdynamik)

In dieser Form parametrisierte Lastprogramme sind relativ wenig fahrzeugspezifisch und unterscheiden beispielsweise kaum nach der Gestaltung von Fahrwerk und Aufbau. Insgesamt ergibt sich dadurch ein für die meisten Fahrzeugtypen eher konservatives Bemessungskollektiv, das nur für Exoten – also beispielsweise die Fahrzeugklasse der Supersportwagen – entsprechend korrigiert wurde.

Der Zugriff auf fahrzeugspezifische Messdaten ist in vielen Fällen kaum möglich, weshalb das Fraunhofer LBF in einigen Fällen über standardisierte Lastprogrammparameter hinausgehende typspezifische Bemessungslasten für die Raderprobung mit Hilfe von MKS-Analysen und GPS-basierten Datenmodellen generiert. Dabei werden wenigstens die »fahr-dynamischen Grenzlaster« auf Basis entsprechender Manöver wie Schwellenüberfahrt oder

stationäre Kreisfahrt simuliert. Darüber hinausgehend besteht aber auch die Möglichkeit einer sehr viel umfangreicheren Simulation des Fahrbetriebs – dann auch unter Einbeziehung von Streckenprofil und Fahrgeschwindigkeit, also einer Art »Offline Fahrbetrieb« [Bild 4.].

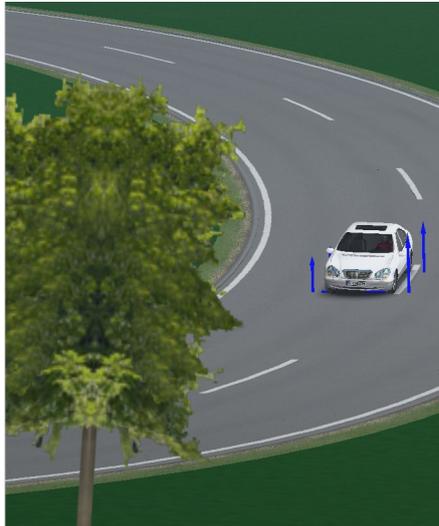


Bild 4. – Querdynamischer »Offline Fahrbetrieb«

Die speziell für Räder und Naben oftmals besonders relevanten Querkräfte bei hochdynamischer Kurvenfahrt lassen sich innerhalb dieser Simulationsmodi ausführlich und sehr gut nachvollziehen. Aufgrund der hinlänglich bekannten Einschränkungen aktueller MKS-Reifenmodelle für die Beschreibung transientser Vertikalcharakteristika können aus der Makrotextur des Fahrwegs abgeleiteter Anregungsmechanismen nicht in der gleichen Güte simuliert werden.

Immerhin ergeben sich aber aus der Analyse des Fahrwegs und dessen Aufteilung in Geradeaus- und Kurvenfahrt eindeutige Optionen zur softwaregestützten Behandlung des querdynamischen Teilkollektivs sowie zu eher statistischen Aussagen über das vertikalkraftdominierte Teilkollektiv.

Elemente der Offline-Simulation des Fahrbetriebs

Für die Konfiguration der Fahrstrecke wurden mit einem GPS-Datensystem die folgenden Daten ermittelt:

- x- und y-Koordinaten des Fahrwegs (Straßenverlauf)
- z-Koordinaten des Fahrwegs (Höhenprofil)
- seitlicher Neigungswinkel der Strecke

Dabei wurde ein herkömmliches System mit einem integrierten SIRF-III GPS-Empfänger genutzt, das mit einer Datenrate von 1 Hz unter anderem die Position, die Geschwindigkeit und die Höhe bestimmt und diese in einer Log-Datei im Format NMEA (National Marine Electronics

Association) abspeichert.

Aus der NMEA-Datei werden die Koordinaten des Straßenverlaufs gefiltert und in Gauß-Krüger-Koordinaten umgerechnet. Das Höhenprofil ist ohne weitere Umrechnungen den NMEA-Einträgen zu entnehmen.

Diese, den Fahrweg grundsätzlich beschreibenden Datensätze [Bild 5.] werden als topographische Randbedingungen innerhalb der Simulationssoftware CarSim® abgelegt und beschreiben das virtuelle Fahrwegprofil. Damit besteht die einfache Möglichkeit im realen Fahrbetrieb gefahrene Strecken in die Simulationsumgebung zu transformieren, um sie dort für eine »Offline-Radlastsimulation« zu nutzen.



Bild 5. – Umsetzung der GPS-Fahrwegkoordinaten in das virtuelle Fahrwegprofil

Die Fahrzeugmodellierung in CarSim® erfolgt in relativ einfacher Weise auf Basis vordefinierter Fahrzeugbibliotheken, die einen breiten Typenbereich vom Kleinwagen bis zum Rennsportfahrzeug abdecken. Die template-artigen Fahrzeuggrunddefinitionen sind frei parametrierbar, in deren entsprechenden Basiskonfigurationen aber bereits sinnvoll einsetzbar. Damit können in einfacher und schneller Weise Parameterstudien bzw. Korrelationsuntersuchungen durchgeführt werden, die für den ausgewählten Fahrzeugtyp eine grundsätzliche Validität haben.

In dieser Form unterscheiden sich CarSim® und dessen Derivat TruckSim® von den sog. »general purpose MBD systems« wie Simpack oder MSC.Adams deutlich: Während die Produkte der letzten Software-Kategorie in sehr allgemeiner Form Körper, Gelenke und Kraftelemente zur Modellierung und Lösung beliebiger kinematischer und kinetischer Aufgaben zur Verfügung stellen, wird in CarSim® bzw. TruckSim® ein für die Modellierung von Fahrzeugen optimierter Code angeboten [Bild 6.]. Dabei

werden beispielsweise über eine vorhergehende experimentelle Identifikation generierte Zusammenhänge hinsichtlich des dynamischen Verhaltens von Kraftfahrzeugen innerhalb solcher Code-Templates abgelegt und stehen dem Anwender ohne aufwendige Modellierungsprozeduren direkt zur Verfügung.

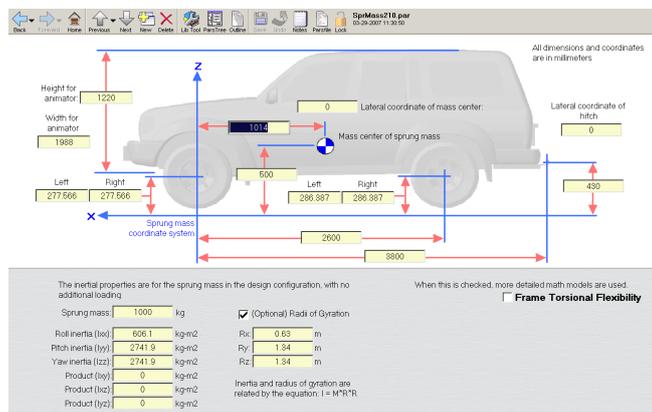


Bild 6. – Definition der Fahrzeugkonfiguration in CarSim®

Der besonderen Relevanz querdynamischer Fahrmanöver besonders für die drehenden Komponenten des Fahrwerks lässt sich mit den zur Verfügung stehenden numerischen Reifenmodellen entsprechen – hier gibt es umfangreiche Untersuchungen, die eine sehr weitgehende Übereinstimmung mit realen Fahrsituationen, aber auch mit MKS-Programmen wie MSC.Adams bestätigen [6].

Statistische Versuchsplanung

Die im Hinblick auf eine deterministische Beschreibung des Fahrzeugs oftmals schwierige Entscheidung einer exakten Definition bestimmter Parameter scheidet vielfach an – speziell in einer frühen Phase der Fahrzeugentwicklung – noch unbekanntem Festlegungen oder nicht genau zu messenden Größen. Deshalb werden im Rahmen dieses Konzeptes maßgebliche Fahrzeugparameter innerhalb deren Erwartungskorridors variiert und im Hinblick auf eine Beeinflussung der wirksamen Radlasten bewertet. Aufgrund der Vielzahl möglicherweise relevanter Parameter sowie deren Variabilität sollte zunächst untersucht werden, in welcher Weise sich eine statistische Versuchsplanung gegenüber einer vollfaktoriellen, d.h. alle möglichen, zufallsartigen Parameterkombinationen berücksichtigenden Versuchsplanung anbietet. Die Anzahl der hierfür benötigten Versuche n ist mit $p = \text{Anzahl der Faktoren}$ und $q = \text{Anzahl der Einstellungen pro Faktor}$ zu berechnen.

$$n=q^p$$

Nachteilig an einer solchen vollfaktoriellen Versuchsplanung ist, dass mit wachsender Anzahl von Einflussgrößen die Zahl der notwendigen Experimente sehr stark ansteigt

und schnell einen selbst in der Simulationstechnik kaum zu bewältigenden Aufwand notwendig macht. Bei acht verschiedenen Parametern und jeweils vier Faktorstufen würden sich beispielsweise mehr als 65.000 Einzelexperimente ergeben.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieses Aufwands besteht in der Anwendung sog. D-Optimaler Versuchspläne, mit deren Hilfe die gewünschten Effekte und Wechselwirkungen eindeutig abgebildet und dennoch die Anzahl der Versuche im Vergleich zu anderen Versuchsplänen reduziert werden. Gegenüber einer vollfaktoriellen Versuchsplanung ergeben sich damit bei z.B. fünf Parametern und jeweils zwei Faktorstufen nur noch die Hälfte der dann notwendigen Experimente – nämlich 16. Aus der vollfaktoriellen Versuchsplanung werden per Zufall diese Anzahl von Versuchen ausgesucht, die in einer Matrix X abgebildet werden. Mit einem iterativen Algorithmus – z.B. DETMAX, Fedorov oder Dykstra – lässt sich schließlich die Determinante $\text{Det}(X^T X)$ bestimmen, wobei es das Ziel ist, jene Versuche aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan zu bestimmen, die schließlich die größte Determinante bilden.

Für eine grundsätzliche Untersuchung von Anwendbarkeit und Grenzen einer D-Optimalen Versuchsplanung zur Reduzierung der Anzahl der Experimente bei der stochastischen Analyse wurden die folgenden drei geometrischen Fahrzeugparameter

- Radstand
- Schwerpunkthöhe
- Spurbreite

in jeweils vier Faktorstufen variiert. Für die vollfaktorielle Versuchsplanung bedeutete dies insgesamt 64 Einzelexperimente, während sich bei der D-Optimalen Versuchsplanung diese Anzahl auf 19 reduzierte.

Die Güte der stochastischen Simulationen wurde auf Basis von Regressionskoeffizienten für die resultierenden Radlasten aus deren horizontaler und vertikaler Komponente bewertet. Der Vergleich der Vektoren mit den jeweiligen Parameterschätzwerten sowie das Signifikanzniveau der jeweiligen Parameter bestätigte die Tauglichkeit der Ergebnisse der D-Optimalen Versuchsplanung. Lediglich in der Bewertung des Signifikanzniveaus der Spurbreite kam es zu einem etwas größeren Unterschied – final lässt sich speziell für den Radstand und mit Einschränkungen für die Spurbreite eine Signifikanz dieser Parameter für die Variabilität der Vertikalkräfte auf der Referenzstrecke ableiten. Mit der Nutzung einer D-Optimalen Versuchsplanung besteht die Möglichkeit, Fahrzeugparameter innerhalb des Korridors ihrer Erwartungswerte zu variieren und damit

die wahrscheinlichen Merkmale von Beanspruchungskollektiven zu beschreiben. Tatsächlich entspricht der hier vorgestellte Ablauf einer »Offline-Lastdatengenerierung« auf Basis fahrdynamischer Simulationen, in deren Verlauf die im Fahrbetrieb gemessenen Strecken- und Geschwindigkeitsprofile als Randbedingungen einer nachgeschalteten MKS-Berechnung wirksam sind.

Offline-Simulation des Fahrbetriebs

Exemplarisch wurde die topologisch sehr anspruchsvolle Feldberg-Strecke im Taunus für fahrdynamische Grundsatzzuntersuchungen ausgewählt [Bild 7.]: Über eine Streckenlänge von ca. 13 km mit einer Höhendifferenz von annähernd 500 m wurden GPS-Fahrbetriebsmessungen durchgeführt. Die Validität der im Fahrbetrieb gemessenen Streckenkoordinaten wurde innerhalb eines Mapping-Prozesses in Google Earth® überprüft – die Abbildung der Strecke entspricht sehr genau dem über die Satellitenbilder abgebildeten Fahrweg.



Bild 7. – Referenzstreckenabschnitt Feldberg im Taunus

Die im Fahrbetrieb erreichten Fahrzeugdurchschnittsgeschwindigkeiten von ca. 55 km/h entsprechen einer auf öffentlichen Straßen noch möglichen Fahrdynamik und wurden als Geschwindigkeitsbasisprofil für die anschließenden Offline-Simulationsläufe genutzt. Die innerhalb der Software verfügbaren Sensoren erlauben die Beschreibung der Last-Zeitreihen im Radaufstandspunkt [Bild 8.] genauso wie die Zeitreihen von z.B. Querbesehleunigung oder Lenkwinkel. Dies erlaubt eine detaillierte Analyse des Fahrwegs, beispielsweise im Hinblick auf dessen Anteil von Kurven- bzw. Geradeausfahrt. Die Überführung der Signal-Zeitreihen in die entsprechenden Kollektivdarstellungen ist genauso möglich wie nach realen Fahrbetriebsmessungen.

Die besonders hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit von CarSim® bei den Offline-Simulationen erlaubt die Berücksichtigung vielfältiger Fahrzeugparameter sowie vollständiger Fahrwegprofile oder wenigstens die Simulation »fahrdynamischer Grenzlasten«. Damit lassen sich wesentliche Charakteristika individueller Fahrzeugplattformen für die Ermittlung der wirksamen Radlasten be-

rücksichtigen und in die Bestimmung typspezifischer Lastprogramme für die Raderprobung überführen.

Die Validität der Simulationsergebnisse wurde anhand der »fahrdynamischen Grenzlasten« und deren experimenteller Ergebnisse aus den LBF-Radlastbibliotheken nachgewiesen.

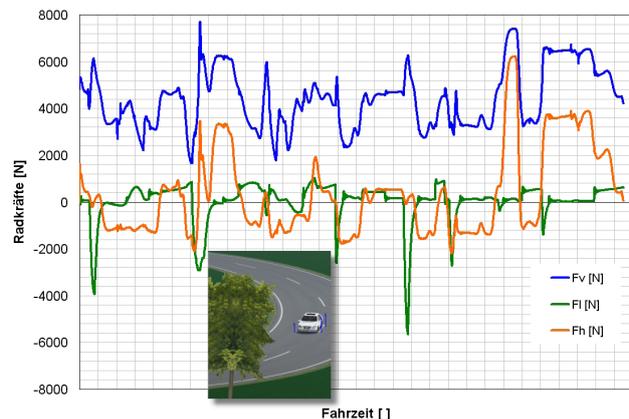


Bild 8. – Radkräfte auf Teilabschnitt Referenzstrecke

Die Anwendung von rechnerischen Parametervariationen im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung führt zu einem weitgehend abgesicherten Korridor für die wirksamen Radlasten und damit zu gültigen, typspezifischen Lastprogrammen für die laborgestützte Betriebslastensimulation drehender Komponenten – selbst ohne vorhergehende Fahrbetriebsmessungen. Damit ergänzt dieses Konzept den vielfach bewährten Ansatz des Fraunhofer LBF radlastendominierte Korrekturfaktoren aus den Lastfallbibliotheken abzuleiten um eine moderne numerische Komponente.

LITERATUR

- /1/ Grubisic, V.: General Aspects and Criteria for Fatigue Evaluation of Wheels; Report No. TB-204, Fraunhofer LBF: 1994
- /2/ Fischer, G., Grubisic, V.: Bemessungskriterien zum Leichtbau von Rädern, VDI Berichte Nr. 1224, Jahrgang 1995
- /3/ Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden: 2000
- /4/ Fischer, G., Grubisic, V., Klock, J.: The biaxial wheel test facility for testing the durability life of automotive wheels, their hubs and bearings; Fraunhofer LBF – Technical Note No. 94/86e, Darmstadt: 1986
- /5/ Heim, R; Wallmichrath, M.; Herbert, A; Krause, I.: Baugruppenerprobung für straßen- und schienengebundene Räder in der integrativen Simulationsumgebung ZWARP; DVM Tag, Berlin: 2007
- /6/ NRTC National Road Transport Commission (Australia): Comparison of Modelling Systems for Performance-based Assessments of Heavy Vehicles; ARRB Transport Research Ltd., Performance based Standards – October 2001