

Baugruppenerprobung für straßen- und schienengebundene Räder in der integrativen Simulationsumgebung ZWARP

R. Heim, M. Wallmichrath, A. Herbert, I. Krause
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

ZUSAMMENFASSUNG

Seit Anfang der 1980er Jahre haben sich die Methoden der zweiaxialen Raderprobung zu einem weitgehend anerkannten Standard in der Laborsimulation entwickelt. Gegenüber anderen Verfahren vereinigt die Zweiaxiale Radprüfeinrichtung (ZWARP) die Vorteile der kompletten Baugruppeninteraktion sowie realitätsnaher Last-Zeit-funktionen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die wesentlichen Charakteristika in der ZWARP-Erprobung von Rädern bzw. Radsätzen von Straßen- und Schienenfahrzeugen sowie den Aufbau der Prüfeinrichtungen. Die Nutzung standardisierter Lastprogramme als ein maßgebliches Konzept wird erklärt und bewertet. Abschließend werden die Merkmale der neuen, aktuell im Fraunhofer LBF entwickelten Generation einer vollkinematischen Simulationsumgebung für die Räderprüfung vorgestellt.

STICHWÖRTER

Betriebslastensimulation, Baugruppe, drehende Komponenten, Zweiaxiale Raderprobung

HOLISTIC TESTING OF AUTOMOTIVE WHEELS AND RAIL VEHICLE WHEEL SETS BY USING BIAx SIMULATION TECHNOLOGY

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. This paper is dealing with the specific characteristics of testing wheels and wheel sets of automotive and rail vehicles as well as the design of the test machines. The basic concept of using standardized load files is presented and evaluated. Finally the features of the new generation test machine are presented which is currently being developed at Fraunhofer LBF.

KEYWORDS

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

Einleitung

Mobilität und Transportkapazität landgebundener Fahrzeuge sind auch das Ergebnis einer der erfolgreichsten Erfindungen in der Menschheitsgeschichte – dem Rad. Mit den zunehmenden Anforderungen hinsichtlich Transport- und Reisegeschwindigkeit sowie Komfort, Ladegut- und Fahrwegschonung entwickelte sich das Rad zu einem Teil eines komplexen Systems, das nicht mehr isoliert von Fahrweg und Anbauteilen zu betrachten ist, sondern unter Einbeziehung der vollständigen Baugruppeninteraktion konstruiert und erprobt wird.

Deshalb wird die Erprobung neu entwickelter Räder teilweise mit dem Fahrversuch von Prototypen kombiniert – eine gleichermaßen kosten- und zeitintensive Versuchsstrategie [Bild 1].



Bild 1 - Fahrerprobung FORD Mondeo MY2007

Besser reproduzierbare Ergebnisse lassen sich mit prüfstandbezogenen Erprobungskonzepten erreichen: So ist beispielsweise die Biegeumlaufprüfung ein maßgebendes Kriterium für die bauartgerechte Zulassung neuer Räder. Allerdings finden sich hierbei entscheidende Einschränkungen in der Simulation wirklich fahrbetriebsähnlicher Belastungen: Die vereinfachenden Prüfungen gewährleisten vorrangig eindeutig beschriebene Randbedingungen für die Erprobung – nicht zwangsläufig sind das auch solche, die zu einer realistischen Abbildung der Belastung von Rädern beitragen.

Demgegenüber berücksichtigen moderne Methoden zur Betriebslastensimulation rotierender Komponenten im Fahrwerksbereich von straßen- und schienengebundenen Fahrzeugen eine möglichst realitätsnahe Belastungs-kinematik sowie die Beanspruchungsmechanismen aus der Baugruppeninteraktion. Mit der Zweiaxialen Radprüfeinrichtung, dem sog. ZWARP, wurden Anfang der 1980er Jahre die ersten prototypischen Konzepte für eine

verbesserte Erprobung von Rädern für PKW und Nfz im Fraunhofer LBF entwickelt und aufgebaut [Bild 2.].

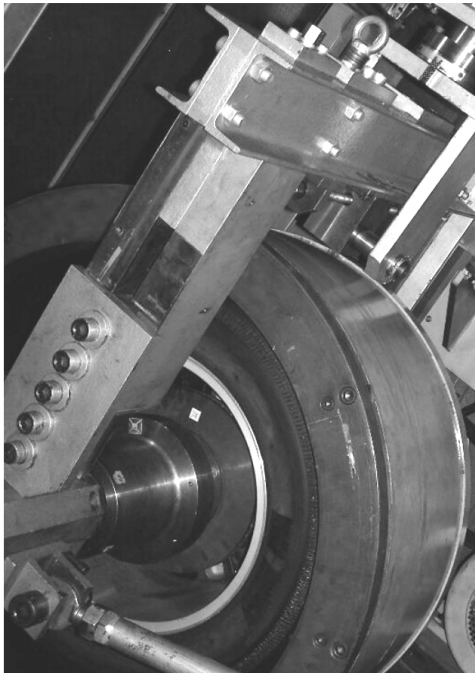


Bild 2. - Innentrommel PKW-ZWARP

Hierbei erfolgt die zweiaxiale Belastung von Rädern, Naben und Lagern in einer rotierenden Innentrommel als Fahrbahnersatz – das entspricht einfach einer Bewegungsumkehr bei sonst dem Fahrbetrieb gleichartigen Belastungsmechanismen [1].

Ende der 1990er Jahre wurde dann am Fraunhofer LBF ein technisch ähnlicher Prüfstand für die Erprobung von Radsätzen schienengeführter Fahrzeuge in Betrieb genommen [Bild 3.] – eine bis heute einzigartige Einrichtung für einen realitätsnahen Betriebsfestigkeitsnachweis von Vollbahn- und Straßenbahn-radsätzen im Labor.

Die hierbei maßgeblichen Konzepte und methodischen Zusammenhänge, aber auch exemplarischen Ergebnisse von Bauteilprüfungen sowie ein Ausblick auf zukünftige Verfahrens- und Prüfstandsentwicklungen sollen in diesem Beitrag zusammenfassend beschrieben werden.

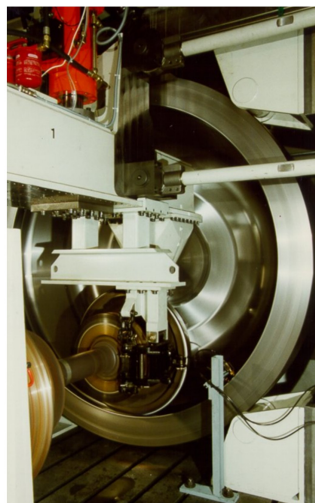


Bild 3 - Zweiaxiale Radsatzprüfeinrichtung

Hauptteil

Fahrzeuigräder sind unmittelbar in den Kontakt zwischen Fahrweg und Fahrzeug eingebunden [Bild 4.] und setzen damit zwangsläufig besonders hohe Anforderungen an Sicherheit und Komfort um. Gerade zunehmende Transportgeschwindigkeit und -kapazität bei nicht immer verbesserter Qualität des Fahrwegs verdeutlichen die Notwendigkeit für gleichermaßen zuverlässige und leistungsfähige Radkonstruktionen, die darüber hinaus

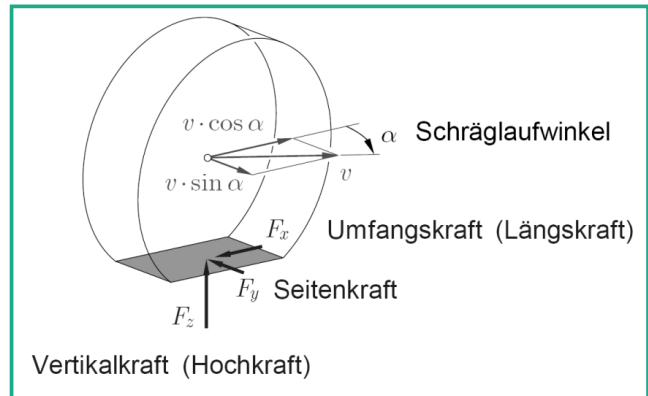


Bild 4 - Kräfte am Reifen

oftmals noch weitere Merkmale – wie z.B. Design oder Geräuschverhalten – zu berücksichtigen haben. Das gepresste stählerne Scheibenrad wurde zunächst in der Eisenbahntechnik eingesetzt, während das Drahtspeichenrad 1870 vor allem für das Fahrrad seine heutige Form erhielt. Die erste Hälfte der 1920er Jahre markiert den Übergang zu moderner Rad- und Reifentechnik: Es wurden das von der Radnabe abnehmbare Scheibenrad mit Bolzenzentrierung und Tiefbettfelge sowie Niederdruckreifen mit Ventil eingeführt [2].

Das spezifische Bewegungsverhalten des Rades – nämlich dessen Rotation – erlaubt die Umsetzung der Drehbewegung in die gewünschte Translation des Fahrzeugs. Damit bewegt sich ein am Radumfang angeordneter Punkt auf einer translatorisch verschobenen Kreisbahn und wird zu einem beliebigen Zeitpunkt während einer vollständigen Radumdrehung einem Winkel zwischen 0° und 360° zuzuordnen sein. Relativ zu der Position des Rad-/Fahrwegkontakts – also der Stellung der größten Belastung – ergeben sich für den betrachteten Punkt also Winkelsegmente, die außerhalb dieses Bereichs liegen und damit für den Punkt eine geringere Beanspruchung bedeuten. Auf diese Weise unterliegt der Punkt am Radumfang allein aus der speziellen Bewegungsform schon einer zyklischen Beanspruchung – unabhängig von bisher nicht betrachteten überlagerten Anregungsmechanismen. Damit ist bereits der grundsätzliche Unterschied in der Belastungsskinematik einer drehenden Komponente des Fahrwerks gegenüber einem radführenden Bauteil beschrieben: Während

beispielsweise die unbeschleunigte Geradeausfahrt auf idealgeometrischem ebenem Fahrweg für Achsschenkel, Lenker- und Achsbauteile einer statischen Beanspruchung entspricht, ergibt sich hier für das Rad bereits eine dynamische Beanspruchung.

Grundsätzlich – und damit in einer gewissen Allgemeingültigkeit für die Beanspruchung von Bauteilen und Baugruppen von landgebundenen Fahrzeugen ergeben sich die äusseren Belastungen aus den für die Fahrwegverfolgung notwendigen Kräften sowie aus jenen, die das Ergebnis von Fahrwegstörungen sind. 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. Hiervon ausdrücklich ausgenommen sind unfallartige Fahrmanöver, die den Sonder- bzw. Mißbrauchslasten zuzuordnen sind und hier nicht betrachtet werden.

Die aus Fahrwegstörungen resultierenden Anregungsmechanismen überlagern sich den Beanspruchungen aus der Fahrwegverfolgung. Aufgrund der von idealgeometrischen Verhältnissen abweichenden Makrotextur bzw. Unebenheiten des realen Fahrwegs ergeben sich Zusatzkräfte mit ausgesprochen transients Charakteristik, die zur Grundbeanspruchung aus der Fahrwegverfolgung überlagerte höherfrequente Beanspruchungen mit zufälliger Phasenlage erzeugen. Die beispielsweise gegenüber der stationären Geradeausfahrt möglichen Lastvielfachen aufgrund transients Anregungsmechanismen aus der Fahrwegstörung können signifikante Größenordnungen erreichen – auch in Wirkungsrichtungen, die völlig unkorreliert zur Grundbeanspruchung sind. So ergeben sich aus der zufälligen Anordnung von schwellen- oder schlaglochartigen Anregungsmechanismen auf einer Schlechtwegstrecke nicht allein Lastüberhöhungen in vertikaler Richtung, sondern auch solche in Längs- und Querrichtung [Bild 5.].

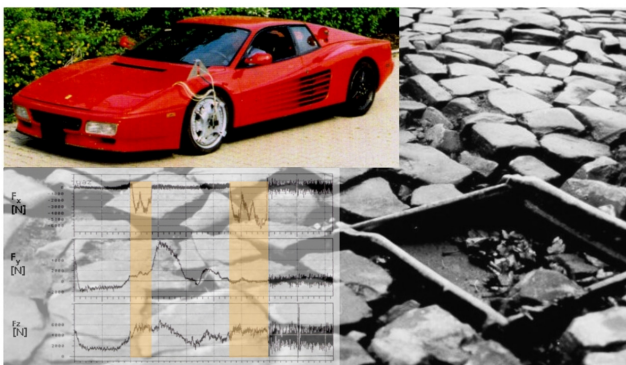


Bild 5 - Zusatzkräfte aus Fahrwegstörung (Schlagloch)

Speziell für straßengebundene Fahrzeuge lassen sich die auf die Räder einwirkenden Kräfte nicht ohne Kenntnis der Kraftübertragung zwischen Fahrbahn und Reifen bestimmen. Das Tragverhalten eines Luftreifens ist durch dessen Innendruck und den zur Fahrbahnoberfläche wirksamen Kontaktbereich, dem sog. Reifenlatsch beschrieben – der für den Aufbau realer Reifen vom Verhalten einer idealen Membran abweichende Traganteil der steifen Schalenstruktur liegt in einer Größenordnung von zusätzlich 10 bis 15% [3]. Das Kraftschlusspotential des Reifens – also dessen Fähigkeit, die zur Fahrwegverfolgung notwendigen Kräfte in Umfangs- und Querrichtung aufzubringen – ist von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Parameter abhängig: Gestaltung der Reifengummimischung, Mikro- bzw. Makrotextur der Fahrbahn, Reifen- und Fahrbahntemperatur, Radlast, Reifenschräglaufwinkel sowie Längs- und Querschlepp sind maßgebliche Größen, die für die Bestimmung im Reifenlatsch wirksamen Kräfte eine Rolle spielen. Während die in der Fahrzeugvertikaldynamik größtmöglichen Kräfte eher den Fahrwegstörungen zuzuordnen sind, ergeben sich für die Lateraldynamik eindeutige Korrelationen zur Fahrwegverfolgung. Die größten Reifenseitenkräfte lassen sich bei möglichst großer Radlast für Reifenschräglaufwinkel $\geq 8^\circ$ erzeugen [Bild 6.], d.h., die bei Kurvenfahrt zwangsläufige Radlasterhöhung des kurvenäusseren Rades $\Delta F_v = F_{v,max} - F_{v,stat}$ und ein entsprechend großer Reifenschräglauf begrenzen die Lateralkraft F_l für heute übliche Reifen auf $F_{l,max} \leq 0,95 \cdot F_{v,max}$. Aufgrund der Kraftschlussgrenzen des Reifens ist in dieser Situation keine zusätzliche Reifenumfangskraft möglich; jede Überlagerung einer Brems- oder Antriebskraft reduziert die gleichzeitig wirksame maximale Seitenführungskraft entsprechend des ellipsenförmigen Kamm'schen Kraftschlusskreises.

Mit diesen Zusammenhängen lassen sich bereits die für das Rad maßgeblichen Maximalkräfte aus der Fahrwegverfolgung abschätzen: Bei einer ideal starren Fahrzeugkarosserie kann die Radlasterhöhung des kurvenäusseren Rades ΔF_v mit Kenntnis von Schwerpunkthöhe h_{CG} , Spurweite b_{Spur} und Fahrzeugquerbeschleunigung a_y näherungsweise zu

$$\Delta F_v = a_y [g] \cdot h_{CG} / b_{Spur}$$

bestimmt werden [4].

Aus einer Vielzahl von Fahrbetriebsmessungen sind am Fraunhofer LBF empirische Lastfallbibliotheken entwickelt worden, die in Abhängigkeit der statischen Radlast individuelle Erwartungswerte für die maximalen Vertikal- und Lateralkräfte bei hochdynamischer Kurvenfahrt ableiten lassen. Damit können generalisierte Lastannahmen für Extremwerte in der stationären Fahrwegverfolgung entwickelt werden.

Die aus den Fahrwegstörungen resultierenden vertikalen Lastüberhöhungsfaktoren n_v sind ganz offensichtlich primär abhängig von Radlast, Unebenheit des Fahrwegs sowie der vertikalen Reifensteifigkeit $c_{T,v}$. Eine hierfür näherungsweise gültige empirische Beschreibung mit einem Faktor für die Fahrwegunebenheit k_R ist /5/:

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

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

Die aus den Fahrwegunebenheiten resultierenden transienten Zusatzbelastungen überlagern sich in zufälliger Weise den Kräften für die Fahrwegverfolgung. Während also jeder Punkt am Umfang eines abrollenden Rades bei der Fahrwegverfolgung vollständig zyklisch belastet wird, sind die zumeist kurzweiligen Zusatzbelastungen im Regelfall nicht über eine gesamte Radumdrehung wirksam. Dies bedeutet eine nur statistisch zu beschreibende Gesamtbelastung für das Rad aus den Kräften für die Fahrwegverfolgung sowie jenen aus den Fahrwegstörungen. Gerade für leistungsfähige Erprobungskonzepte können diese Zusammenhänge vorteilhaft genutzt werden: Diskrete Segmente als Teiler rotationssymmetrischer Komponenten können als »ideelle Mehrprobenkonfiguration« interpretiert werden, wenn die eigentlich zufälligen Kräfte aus der Fahrwegstörung als stationäre Zusatzbelastung überlagert werden. Mit der Änderung der ursprünglich transienten Charakteristik der Kräfte aus der Fahrwegstörung in wenigstens für eine Radumdrehung wirksame quasistatische Zusatzkräfte kann die Belastung eines abrollenden Rades durch die Kräfte zur Fahrwegverfolgung und der quasistationären Fahrwegstörung zusammengesetzt werden.

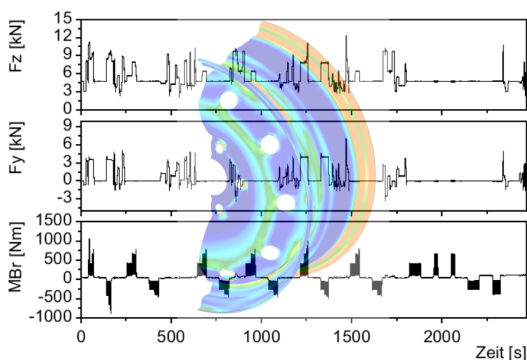


Bild 7 Blockprogramm Lastsequenzen im ZWARP

Damit werden gerade auch experimentelle Erprobungs-

konzepte für die Betriebsfestigkeit von Rädern auf quasistatische Lastkombinationen reduziert, was im Hinblick auf den konstruktiven und steuerungstechnischen Aufwand sowie den Energiebedarf der Prüfeinrichtungen vorteilhaft ist [Bild 7.]. Heute übliche Ausführungen von Scheibenrädern für Straßenfahrzeuge und Schienenfahrzeuggradsätzen werden vorrangig durch Vertikal- und Lateralkräfte, sehr viel weniger durch Umfangskräfte beansprucht /6/. Methoden für den modernen Betriebsfestigkeitsnachweis solcher Scheibenräder müssen also wenigstens die fahrphysikalisch begründeten Lastkombinationen in vertikaler und horizontaler Richtung abbilden, wobei die relevanten Kraftvektoren in Größe und Wirkungsrichtung variabel sind, aber quasistationären Charakter haben.

Die am Fraunhofer LBF Anfang der 1980er Jahre entwickelte Zweiaxiale Radprüfeinrichtung – kurz: ZWARP – nutzt eine motorisch angetriebene Innentrommel als bewegte Fahrbahn und die Rotation des Rades um dessen horizontale Achse als funktionalen Freiheitsgrad. Das luftbereifte Rad wird mit Hilfe von servohydraulischen Aktoren gegen die Lauffläche der Trommel gedrückt und gewährleistet so den Kraftschluss in Umfangsrichtung. Aufgrund der metallischen Fahrbahnoberfläche und des ungelenkten Rades im Prüfstand ist dessen Kraftschlusspotential in Seitenrichtung gegenüber den im Fahrbetrieb möglichen Kräften viel zu gering, weshalb der Aufbau der Reifenseitenkräfte im ZWARP in anderer Weise erfolgt: Die Reifenseitenwand wird gegen seitliche Anlaufinge gedrückt. Die damit grundsätzlich andere Belastung des Reifens gegenüber dem realen Fahrbetrieb ermöglicht deshalb auch explizit keine Reifenerprobung in der Zweiaxialen Radprüfeinrichtung. Aufgrund der Aufteilung des gesamten Kraftschlusses in die Bereiche Reifenlatsch und –seitenwand sowie durch die reduzierte Walkarbeit des in der Innentrommel abrollenden Reifens zeichnet sich die Räderprüfung im ZWARP durch einen im Regelfall außergewöhnlich niedrigen Reifenverschleiss aus. Im Hinblick auf die Beanspruchung des Rades gerade bei den über die Reifenseitenwand eingeleiteten Querkraften würde sich ohne Korrektur der Radkinematik eine unzulässige Abweichung vom Reifenaufstandspunkt und der Radmittelebene ergeben. Mit einem Radsturzkorrekturwinkel (engl. *kinematic tilt angle*) – also einer Drehung des gesamten Rades um dessen Längsachse – wird die Radkinematik so korrigiert, dass für alle fahrphysikalisch begründeten Kombinationen von Vertikal- und Lateralkräften der resultierende Kraftvektor dem des realen Fahrbetriebs entspricht.

Während bei der am Fraunhofer LBF entwickelten Prüfeinrichtung der Drehpunkt für die kinematische Korrektur aus Gründen einer bestmöglichen Bewegungsstabilisierung in den Fahrweg gelegt wurde, ergeben sich bei kon-

strukturellen Varianten von INSTRON oder KLOCK teilweise instabile Betriebszustände aufgrund des ausserhalb des Fahrwegs angeordneten Drehpunktes [Bild 8.].

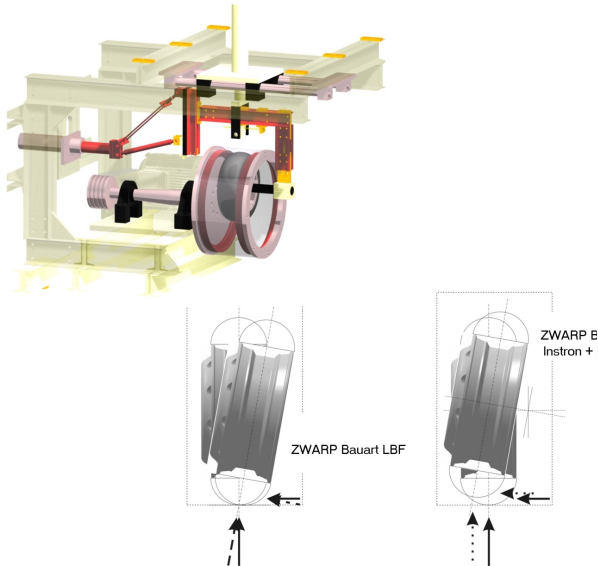


Bild 8 - Drehpunkt des Rades in der Trommel

Die von KLOCK später gebauten Prüfeinrichtungen setzten als ein spezielles Merkmal elektromechanische Antriebe ein – bei einem sonst unveränderten kinematischen Konzept lassen sich die mit Elektrozylindern realisierten größeren Hubbewegungen vorteilhaft für eine verbesserte Bewegungsstabilisierung nutzen.

Der am Fraunhofer LBF aufgebaute Schienenradsatzprüfstand ist in dessen technischer Konzeption direkt vergleichbar mit dem ZWARP – folgerichtig wird er deshalb auch als Schienen-ZWARP bezeichnet. Der Fahrweg wird hier mit einem in einer Trommel montierten Schienenring simuliert, der in seiner Querschnittsgestaltung weitgehend einer konventionellen Schiene entspricht und damit die experimentelle Erprobung von Radsätzen für Vollbahnen und Straßenbahnen ermöglicht. Völlig analog zu den Belastungsmechanismen in den traditionellen ZWARP werden auch die Schienenradsatzkomponenten mit Vertikal- und Lateralkräften beaufschlagt – in diesem Fall erfolgt die Spurführung sowie die Krafteinleitung im Rad-/Schienekontaktbereich aber bereits weitgehend realistisch, weshalb keine Korrektur der Kinematik des Radsatzes notwendig ist. Unvermeidbar sind dagegen im Schienen-ZWARP auch prüfstandsseitig gewisse Verschleissmechanismen des Fahrwegs: Fertigung, Austausch und Montage des Schienenrings stellen aufgrund der im Prüfstand realisierten großen Trommelgeschwindigkeiten von bis zu 350 km/h hohe Anforderungen an Herstellungs- und Einbaugenauigkeit sowie Auswuchttechnik.

Die großen Fahrgeschwindigkeiten in den Zweiaxialen

Radprüfeinrichtungen sind ein systemimmanenter Vorteil der Fahrwegsimulation mit Hilfe einer Innentrommel: Die Prüfstände für die Straßenfahrzeugkomponenten ermöglichen einen Prüfumfang von etwa 2.500 km innerhalb eines Tages, wogegen traditionelle Aussentrommelprüfstände hierfür bis zu einer ganzen Woche benötigen. Damit sind die Voraussetzungen des ZWARP für eine zeitlich wie wirtschaftlich interessante Größenordnung zeitgeraffter Betriebsfestigkeitsprüfungen außerordentlich günstig – tatsächlich lässt sich die gesamte Bemessungslbensdauer von PKW-Rädern in einem Umfang von etwa 10.000 km Prüfstandskilometern simulieren; derjenige für Komponenten von schweren Nutzfahrzeugen ist doppelt so groß.

Das Konzept der Betriebslastensimulation für rotierende Komponenten in der Zweiaxialen Rad-/Nabenprüfeinrichtung beinhaltet neben den prüfstandstechnischen Voraussetzungen für die Abbildung fahrphysikalisch begründeter Lastkombinationen [Bild 9.] auch die betriebsähnliche Abfolge der Lastsequenzen innerhalb standardisierter oder fahrzeug- bzw. fahrwegspezifischer Lastprogramme. Aufgrund der Umsetzung der Kräfte aus der Fahrwegstörung in wenigstens für eine Radumdrehung wirksame quasistatische Zusatzkräfte und deren Superposition zu den Kräften aus der Fahrwegverfolgung ergibt sich eine relativ einfache Gestaltung der Lastprogramme in Form unterschiedlicher, geblockter Sequenzen, deren Durchmischung und Wiederholhäufigkeit den annähernd zufälligen Charakter in der Erprobung begründen. Der mit standardisierten Lastprogrammen gestaltete Erprobungsumfang ist äquivalent zu dem in einem Fahrzeuglebenszyklus erwarteten Schädigungsinhalt

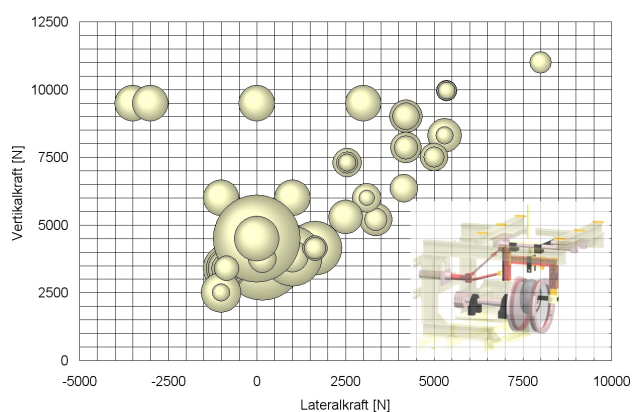


Bild 9 - Standardisiertes Lastprogramm "Europazyklus-PKW"

und entspricht damit einem zensierten Bewertungskonzept: Der Betriebsfestigkeitsnachweis ist positiv erbracht, wenn eine genügend große Stichprobe ausfallfrei die Versuchsdauer übersteht. Wichtig ist hierbei eine konsensuale Definition von »Schaden« bzw. »Ausfallfreiheit« – gerade für die vielfach genutzten standardisierten Er-

probungsumfänge wie z.B. auf Basis der Lastprogrammfamilie »Europazyklus« lassen sich Prüfergebnisse bestätigten Feldbeobachtungen zuordnen. Dabei umfasst die als »Europazyklus« benannte Familie von standardisierten ZWARP-Lastprogrammen unterschiedliche Fahrzeugkategorien wie PKW oder Vorderachse, Auflieger- bzw. Anhängerachsen von schweren Nutzfahrzeugen. Der mit den Lastprogrammen in zeitgeraffter Form beschriebene Schädigungsinhalt entspricht dem für die Auslegung von PKW bzw. LKW oder Bus angenommenen Nutzungsumfang [7]. Aufgrund der besonderen Sicherheitsanforderungen an Komponenten wie Rad oder Nabe sind für die betriebssichere Nutzungsdauer spezielle Randbedingungen zu formulieren: Im Hinblick auf nur statistisch zu beschreibende Merkmale hinsichtlich Fahrleistung sowie Beanspruchungshöhe und -intensität sind auch individuelle Kombinationen abzudecken, die einen besonders großen Schädigungsinhalt versprechen. Der LBF-Sicherheitsphilosophie entsprechend hat das der Lastprogrammfamilie »Europazyklus« zugrundeliegende Bemessungskollektiv eine Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A \leq 1\%$, d.h., es ist kaum wahrscheinlich, dass ein individueller Fahrzeugnutzer einen derart großen Schädigungseintrag induziert wie es in der LBF-Bemessungslebensdauer berücksichtigt wird [Bild 10.].

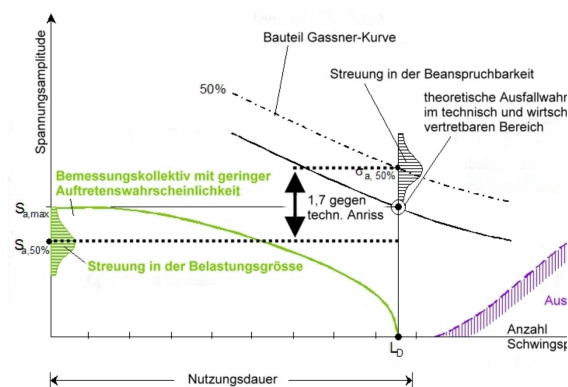


Bild 10 - LBF-Bemessungskollektiv

Die standardisierten Lastprogramme für die experimentelle Erprobung in der Zweiaxialen Rad-/Nabenprüfeinrichtung sind leistungsfähige Instrumente in der Betriebslastensimulation konventionell gestalteter Baugruppen. Dies impliziert die Ausführung der Bauteile in der heute zumeist üblichen Form – also Standardbereifung sowie Scheibenräder aus Stahl- oder Aluminiumlegierungen. Neuere Entwicklungen in der Rädertechnik nutzen beispielsweise das Leichtbaupotential faserverstärkter Polymersysteme, deren grundsätzlich andere Schädigungsmechanismen dann auch differenzierte Lastprogramme für den experimentellen Betriebsfestigkeitsnachweis erfordern. Aktuell ist dies ein Forschungsschwerpunkt im Fraunhofer LBF [8].

Eine von der Standardbereifung abweichende Reifentechnologie ist zur Zeit ein Trend wenigstens in der Erstausrüstung von Kraftfahrzeugen: Die sog. *runflat* Reifen (RFT) – also Reifen mit Notlaufeigenschaften – werden zumeist mit verstärkten Seitenwänden ausgeführt und sind auch als *self supporting tires* (SST) oder *extended mobility tires* (EMT) bekannt. Die speziellen Vorteile solcher Reifen werden bei schleichendem oder plötzlich auftretenden Druckverlust deutlich: Die Notlauffähigkeit bewahrt den Reifen vor den üblichen Problemen einer zu starken Erhitzung bis hin zum Brand des Reifens sowie einem gewissen Kraftschlusspotential bei Kurvenfahrt ohne die Gefahr eines Abspringens des Reifens von der Felge. Aufgrund der deutlich verstärkten Querschnitte des Reifens im Bereich der Seitenwand erhöht sich das Reifengewicht aber um etwa 25% – beispielsweise von 9,6 kg auf 12,0 kg für einen Reifen der Dimension 225/45 R17. Weitere Unterschiede zu Standardreifen ergeben sich durch den geänderten Aufbau der RFT auch für die statischen und dynamischen Reifensteifigkeiten [9]. Für die Fahrzeuginsassen hat dies vordergründig Auswirkungen auf deren Komfortempfinden: Beim Überfahren von Fahrbahnebenheiten erleben viele Passagiere eine vorher nicht gekannte Stossanregung. Die deutlich steifere Reifenfeder sowie ein gegenüber Standardreifen größerer Geschwindigkeitseinfluss begründet die mit *runflat* Reifen häufig assoziierten, eher negativen Merkmale. Tatsächlich sind die beim Überfahren von Unebenheiten generierten Kräfte auch deutlich größer, wobei speziell bei kurzzeitigen Anregungsmechanismen die schon angeführte Geschwindigkeitsabhängigkeit einen zusätzlichen Einflussparameter abbildet. Damit wird gerade bei Schlechtweg-

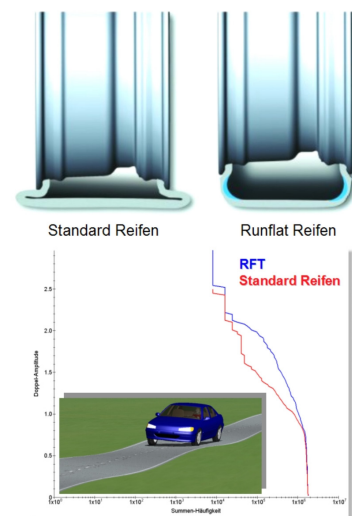


Bild 11 - Schlechtweg-Radlastkollektive

anregung das individuelle Belastungskollektiv von *runflat* Reifen sowohl bezüglich der Spitzenwerte als auch der Fülligkeit des Spektrums deutlich unterschiedlich zu dem von konventionellen Reifen [Bild 11.]. Dies macht auch verständlich, weshalb bei dem Einsatz von *runflat* Reifen teilweise umfangreiche Änderungen in Aufbau und Abstimmung von Radführungs- und Federungssystemen vorgesehen werden.

Für die experimentelle Erprobung von neuen Rädern, die für eine Verwendung von Reifen mit Notlaufeigenschaften freigegeben werden sollen, ergeben sich damit ver-

änderte Lastrandbedingungen: Bisher verwendete Spezifikationen in vereinfachenden Verfahren, aber auch in der Zweiaxialen Radprüfeinrichtung sind für *runflat* Reifen nicht mehr zwangsläufig gültig. Hier wird auch offensichtlich, in welchem Umfang die Biegeumlaufprüfung einem stark vereinfachenden Verfahren entspricht – der Reifen und dessen spezielle Charakteristik im Hinblick auf die Erzeugung äußerer Belastung wird in dieser Prüfung überhaupt nicht berücksichtigt.

Das Fraunhofer LBF wird dementsprechend seine bisher nur für Standardbereifung etablierte Lastprogrammfamilie um ein spezielles Lastprogramm für die experimentelle Erprobung mit *runflat* Reifen erweitern – erste Ergebnisse mit einem Lastprogrammmentwurf liegen vor und bestätigen die Notwendigkeit eines solchen Lastprogramms /10/.

Am Beispiel der Reifen mit Notlaufeigenschaften wird auch in besonderer Weise deutlich, dass neuere technische Entwicklungen zunächst unbeachtete Implikationen auf andere Komponenten haben können. Die Fähigkeit der Zweiaxialen Radprüfeinrichtung zur realitätsnahen Betriebslastensimulation von Rädern, Naben und Lagern auch bei geänderten technischen Randbedingungen – wie beispielsweise aufgrund des Einsatzes von *runflat* Reifen – zeigt das Potential dieser Methode. Mit der Einbindung der gesamten Baugruppeninteraktion sowie generalisierten oder nahezu beliebig spezifischen Lastprogrammen wird die Zweiaxiale Radprüfeinrichtung zu einer integrativen experimentellen Simulationsumgebung, die gegenüber allen anderen Verfahren einen deutlichen Zugewinn an Experimentierfähigkeit, Realitätsbezug und Relevanz bietet.

Nach mittlerweile rund 25 Jahren, in denen sich die Zweiaxiale Radprüfeinrichtung zu einem in Europa und Nordamerika anerkannten Verfahren entwickelt hat, ergeben sich gerade durch neue Optionen in der Automatisierungstechnik vielfältige und interessante Perspektiven für eine Weiterentwicklung dieser Methode. Der durch das Fraunhofer LBF in diesem Umfeld formulierte Anspruch sieht eine neue Generation von Prüfeinrichtungen – zunächst für die Komponenten von PKW und Transportern – als eine »vollkinematische Umgebung für die Zuverlässigkeitserprobung« (*»full kinematic wheel reliability«*). Dabei werden erstmals auch bisher nicht in die Erprobung eingebundene kinematische Freiheitsgrade des Rades berücksichtigt – beispielsweise die Drehmomentenbelastung oder der Reifenschräglauf. Dies bedeutet eine weiter verbesserte Simulationsgüte in der Erprobung drehender Komponenten. Gleichzeitig werden mit einer antriebsseitigen Neukonstruktion die Voraussetzungen geschaffen, dass die heute zumeist statisch programmierten Lastpro-

grammsequenzen in einem dynamisierten Modus ablaufen können, d.h., eine weitere Prüfzeitverkürzung allein durch optimierte Laufzeitmodi möglich sein wird.

Ende 2007 wird das Fraunhofer LBF den ersten Prototypen der neuen Generation vorstellen und ab 2008 an Kunden ausliefern können. Die vollständige Kompatibilität zu den bisherigen Zweiaxialen Radprüfeinrichtungen sowie erweiterte Merkmale für die Betriebslastensimulation rotierender Komponenten zeigen die Bedeutung dieser Entwicklung für eine vollkinematische Zuverlässigkeitserprobung von Rädern, Naben und Lagern im Labor.

Literatur:

- /1/ Grubisic, V.: General Aspects and Criteria for Fatigue Evaluation of Wheels; Report No. TB-204, Fraunhofer LBF: 1994
- /2/ Arkenbosch, M., Mom. G, Nieuwland. J.: Das Auto und sein Fahrwerk; Band 1 + 2, Motorbuch Verlag Stuttgart: 1992
- /3/ Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden: 2000
- /4/ Gasch, R., Knothe, K.: Strukturmechanik – Band 1 – Diskrete Systeme; Springer Verlag Berlin, Heidelberg: 1987
- /5/ 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
- /6/ Fischer, G., Grubisic, V.: Bemessungskriterien zum Leichtbau von Rädern, VDI Berichte Nr. 1224, Jahrgang 1995
- /7/ Heim, R., Fischer, G., Sonsino, C. M.: Early Stage Rig Testing for Durability Approval; SAE Paper 2006-01-0116: 2006
- /8/ Büter, A., Bolender, K.: Hochfeste Kunststoffstrukturen – Fahrzeugräder aus Sheet Moulding Compound (SMC); DVM-Tag 2007 – Reifen, Räder, Naben, Bremsen, Berlin: 2007
- /9/ Jeschor, M.: Ein neues Verfahren zur Bewertung von Runflat-Reifen – ein Beitrag zum reservenradlosen PKW; Dissertation TU Dresden: 2005
- /10/ Heim, R., Krause, I., Weingärtner, S.: Runflat-Technology and its Impact on Design and Durability of Wheels; SAE Paper 2007-01-1532: 2007