

## Zeitverkürzende Lastprogramme für die Qualitätssicherung bei Rädern

R. Heim, S. Weingärtner, J. Gagern\*  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF  
Innkeeper LLC, Canton, Michigan, USA\*

### Zusammenfassung

Die prüfzeitverkürzte Betriebslastensimulation drehender Fahrwerkskomponenten wird oftmals mit der Methode der Zweiaxialen Rad- und Nabenprüfung unter Anwendung entsprechender Lastprogramme dargestellt. Üblicherweise werden diese Lastprogramme von Bemessungskollektiven abgeleitet und übersetzen deren Schädigungsinhalte in einen experimentellen Umfang von etwa 10.000 km für PKW-Komponenten.

Auf Basis eines für ein PKW-Stahlscheibenrad abgeleiteten Bemessungskollektivs wurde ein bauteilspezifisches Lastprogramm für die Laborerprobung vollständiger Stichproben entwickelt und hinsichtlich dessen Gesamtlaufzeit optimiert. Die zeit- und kosteneffektive Nutzung in dieser Form optimierter Lastprogramme sowie die hiermit erreichten Ergebnisse für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Fahrzeugrädern werden in dem Vortrag beschrieben.

Abschliessend werden die technischen und wirtschaftlichen Perspektiven in der Nutzung stark zeitverkürzender Lastprogramme sowie deren Implikation auf die Anwendung vereinfachter Prüfverfahren dargestellt.

### Stichwörter

Versuchszeitverkürzung, ZWARP, Räderprüfung, Qualitätssicherung

## ACCELERATED LOAD FILES FOR QUALITY CONTROL IN WHEEL MANUFACTURING

### Abstract

BiAxial wheel fatigue tests have been developed to an established standard for laboratory road simulation using test machine related load files. Normally these load files are derived from design spectra and transform their damage content into an accelerated life test of about 10,000 km for passenger car components.

Based on the design spectra of a passenger car steel wheel a load file was developed specifically designed for non-censored tests. This report illustrates time and cost advantages using this load file for quality control in wheel manufacturing as well as its implication on the simplified test procedures is shown.

### Keywords

Accelerated life test, BiAxial wheel fatigue test, quality control

### EINLEITUNG

Mangelnde Produktqualität ist die häufigste Ursache für Reklamationen und Beanstandungen sowie die Haftung eines Herstellers. In der Definition der Norm [1] ist Qualität „die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte oder vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“. Dabei bestimmt der Begriff Einheit „das, was einzeln beschrieben und betrachtet werden kann.“ Demnach bezieht sich die Qualität auf Merkmale und Eigenschaften eines fertigen Produktes nach dessen Herstellung, wobei angenommen wird, dass diese Eigenschaften noch eine gewisse Zeit nach der Herstellung erhalten bleiben. Sobald festgelegt wird, dass die nach der Herstellung vorhandenen Merkmale und Eigenschaften über eine definierte Nutzungszeit erhalten bleiben sollen, erhält die Qualität ein neues Merkmal – nämlich jenes der Zuverlässigkeit.

Die Zuverlässigkeit ist damit ein Aspekt der technischen Unsicherheit [2], was die Anwendung statistischer und wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden erfordert. Begrifflich sind Zuverlässigkeit und Qualität nahe beieinander liegend; dabei ist die Zuverlässigkeit nur dann quantifizierbar, wenn ein Zeitbezug hergestellt werden kann. Neben der Nutzungszeit ergeben sich weitere wesentliche Einflussgrößen auf die Zuverlässigkeit: Häufigkeit und Intensität der Nutzung sowie Nutzungsumfeld und -umwelt beschreiben solche Einflüsse.

Die Zuverlässigkeit  $R$  (engl.: reliability) gibt die Fähigkeit einer Einheit an, deren Funktion unter vorgegebenen Arbeits- und Umgebungsbedingungen vollständig zu erfüllen [3]. Mit anderen Worten ist dies die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Zeitspanne  $T$  kein Ereignis auftritt, das die Funktion der Einheit beeinträchtigt. Unter dem Begriff der Einheit ist hier je nach Betrachtungsweise ein Gesamt- oder Teilsystem, eine Funktions- oder Baugruppe oder ein Einzelteil zu verstehen.

Die Ausfallrate  $\lambda(t)$  einer Einheit mit einer stetigen *ausfallfreien Nutzungszeit*  $t$  ist eine auf  $\delta t$  bezogene Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall im *Zeitintervall*  $[t, t+\delta t]$  mit der Bedingung, dass diese Einheit ab der Zeit  $t = 0$  genutzt wurde und im Intervall  $[0, t]$  nicht ausgefallen ist. Die Ausfallrate einer Einheit ist im allgemeinen Fall nicht konstant über die Zeit und wird häufig in Form einer *Badewannenkurve* dargestellt. Es kann unterschieden werden zwischen:

- qualitätsbedingten Ausfällen, die vor allem als Frühausfälle auftreten:
  - Entwurfs- und konstruktionsbedingte Fehler: Der Entwurf entspricht nicht den gestellten Spezifikationen. Fehler, die durch eine nicht ausgereifte Konstruktion verursacht werden, können alle anderen Fehler deutlich überreffen
  - Herstellungsfehler: Es werden fehlerhafte Materialien verwendet (mangelnde Qualitätskontrolle), die Fertigungsanlagen und -methoden und/oder das Personal sind für die Herstellung ungeeignet
  - Installations- oder Transportfehler: Fehler am Produkt entstehen durch falsche Installation bzw. Inbetriebnahme oder durch unsachgemäßen Transport
- zufälligen physikalischen Ausfälle, die vor allem durch mechanische und thermische Beanspruchung sowie durch Feuchtigkeit entstehen. Die Ausfallrate ist nahezu konstant oder leicht ansteigend
- Verschleiss- oder Ermüdungsausfälle, die gegen Ende der Nutzungsdauer auftreten und eine ansteigende Ausfallrate aufweisen

Mit Hilfe einer geeigneten mathematischen Verteilungsfunktion lässt sich ein in dieser Art differenziertes Bild des Ausfallverhaltens bewerten; hierfür wird häufig die *Weibull-Gnedenko-Exponentialverteilung* – kurz: *Weibull-Verteilung* – genutzt, die als zwei- oder dreiparametrische Verteilungsfunktion einen *Formparameter*  $b$  formuliert, dessen Größe direkt Angaben über die Art des vorliegenden Ausfallverhaltens ermöglicht.

Aufgrund hoher zeitlicher und kostenseitiger Aufwendungen werden häufig Prüfungen nur an einer Teilmenge der hergestellten Produkte durchgeführt. Diese Stichprobe ist dann repräsentativ für die gesamte zu beurteilende Menge – die Grundgesamtheit, die als Gesamtmenge aller Einheiten der statistischen Betrachtung zugrunde liegt.

## RÄDERPRÜFUNGEN

Für eine Stichprobe von insgesamt acht gleichartigen Stahlrädern 6,5Jx16 wurden in eigenen Untersuchungen die Versuchslaufzeiten bis zu einem als kritisch zu bewertenden Ermüdungsschaden dokumentiert (Bild 1), wobei diese Versuche unter realitätsnahen Belastungsbedingungen in einer Zweiaxialen Räderprüfeinrichtung (ZWARP) mit einem Standardlastprogramm durchgeführt wurden.

Diese Laboreinrichtungen für eine realitätsnahe Erprobung von Rädern für PKW und Nfz wurden Anfang der 1980er Jahre am Fraunhofer LBF entwickelt und aufgebaut; heute erfolgt die Nutzung solcher Prüfeinrichtungen weltweit bei führenden Automobil- und Räderherstellern

[4]. Die zweiaxiale Belastung der Räder erfolgt dabei mit fahrbetriebsähnlichen Kombinationen von Vertikal- und Horizontalkräften in einer rotierenden Innentrommel als Fahrbahnersatz – das entspricht der Bewegungsumkehr bei sonst zum Fahrbetrieb gleichartigen Wirkmechanismen.

Die Ermüdungsschäden wurden entweder durch einen rissbedingten Steifigkeitsabfall oder durch Reifeninnendruckverlust bei Schäden im Felgentiefbett detektiert.

Die Auswertung in Form einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung ergab für diese Stichprobe eine Streuung der Lebensdauerwerte  $T_{N(Pf=90\%;10\%)} = 1:1,9$  sowie einen Formfaktor  $b = 4,9$  – also eine klare Zuordnung zu ermüdungsbedingten Ausfällen entsprechend obigen Ausführungen. Mit der hier vorliegenden Dichtefunktion der Stichprobe kann auf eine für die Grundgesamtheit wahrscheinliche gültige Normalverteilung geschlossen werden (Bild 2), was im Mittel bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen vielfach zutreffend ist.

Neben diesem zeitlichen Verlauf der Ausfallrate können Ausfälle auch nach den folgenden Kriterien geordnet werden:

- dem zeitlichen Verlauf des Ausfallprozesses:
  - Driftausfall: Ausfall infolge einer zeitveränderlichen partiellen Abnahme der Funktionsfähigkeit
  - Sprungausfall: Plötzlicher Ausfall ohne Vorankündigung, der im Allgemeinen auch nicht durch Inspektion oder Zustandsüberwachung vor seinem Auftreten entdeckt werden kann
- der logischen Abfolge:
  - Primärausfall: Ausfall der betrachteten Einheit durch eigenes Versagen
  - Sekundärausfall: Ausfall der betrachteten Einheit, bedingt durch vorausgehenden Ausfall einer anderen Einheit
  - Ausfall in mehreren Einheiten aufgrund gemeinsamer Ursache
- der Erscheinungsform:
  - Teilausfall: Verlust der Fähigkeit die geforderte Funktion voll zu erfüllen, aber teilweise Erhaltung der Funktionsfähigkeit
  - Vollausfall
- der Ausfallwirkung (den Ausfallfolgen) im Rahmen von Ausfallklassen bzw. Ausfallrisikoklassen:
  - unkritischer Ausfall: Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit ohne weitere Gefahren für eine Beschädigung des Systems selbst, von Menschen oder der Umwelt
  - kritischer Ausfall: Verlust der Funktions-

fähigkeit mit der Gefahr von Folgeschäden am System oder geringer Gefährdungswahrscheinlichkeit für Menschen oder Umwelt

- o katastrophaler/gefährlicher Ausfall: Verlust der Funktionsfähigkeit mit der Gefahr der Zerstörung des Systems oder mit potentieller Gefährdung von Menschen oder Umwelt

Speziell Fahrwerkskomponenten von Kfz sind im Hinblick auf die Kritikalität von Versagensfolgen als mindestens kritisch, im Fall von Rädern und Radnaben aber sogar als gefährlich einzustufen. Das Ausfallrisiko für diese Kategorie von Bauteilen ist also entsprechend gering zu halten, was durch eine sorgfältige Konstruktion sowie adäquate Qualitätssicherungsmaßnahmen zu gewährleisten ist.

## QUALITÄTSSICHERUNG

Die Zuverlässigkeit technischer Produkte wird durch deren Überlebens- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt, wobei entsprechende Ausfälle zufällig auftreten – also zu einem vorher nicht bestimmbar Zeitpunkt. Diese Definition eines Zufallsversagens ist jedoch nur dann zulässig, wenn die festgelegten Merkmale hinsichtlich der Eignung des Produktes nachweislich erfüllt sind. Damit wird eine geeignete Qualitätssicherung zur Voraussetzung für die Zulässigkeit wahrscheinlichkeitstheoretischer Zuverlässigkeitsuntersuchungen.

Mit Qualitätssicherungsvereinbarungen wird zwischen einem Hersteller und einem Lieferant vertraglich die Qualität von dessen Leistung und/oder die Folgen fehlender Qualität dieser Leistungen geregelt. Inhaltlich werden darin beispielsweise die Art und Durchführung von Qualitätssicherungsmaßnahmen, die Erstbemusterung oder Art und Umfang von Stichprobenprüfungen vertraglich festgehalten. Die qualitätsbezogenen Kosten stellen mit 5 bis 15% der Herstellkosten einen signifikanten Anteil – und damit auch ein bedeutendes Rationalisierungspotenzial dar. Dabei werden nur etwa 10% der gesamten Aufwendungen im Qualitätsmanagement für präventive Massnahmen eingesetzt; der grössere Anteil wird in etwa gleichen Teilen für Mess- und Prüfmassnahmen sowie für Fehler- und Fehlerfolgekosten eingesetzt [5].

Im Hinblick auf die Produktion und Qualitätssicherung von Fahrzeugrädern werden verschiedene Kategorien unterschieden: neben den sog. Originalrädern – also solchen, die der Fahrzeughersteller verwendet und damit Bestandteile der Fahrzeug-ABE sind – gibt es sog. Identräder für den Nachrüstmarkt, die mit den Serienwerkzeugen gefertigt werden, sowie Nachbauräder, die den Identrädern in Form, Abmessung und Werkstoff entsprechen. In einer weiteren Gruppe sind all jene Räder berücksichtigt, die nicht den Originalrädern entsprechen und nicht in der Fahrzeug-ABE enthalten sind. Diese sog. Sonderräder

erhalten eine separate ABE oder müssen in die Fahrzeugpapiere eingetragen werden und haben jeweils eine eigene KBA-Nummer.

In technischen Regelwerken finden sich zahlreiche Anleitungen, Empfehlungen sowie Richtlinien zur sicheren Gestaltung von Produkten. Im Gegensatz zu Rechtsnormen erfolgt die Beachtung dieser technischen Regelwerke auf freiwilliger Basis. Allerdings dokumentieren diese technischen Standards sehr häufig den Stand der Wissenschaft und Technik und verpflichten aus diesem Grund den Hersteller diesem in geeigneter Weise Rechnung zu tragen.

Die Biegeumlaufprüfung ermöglicht die Durchführung von Festigkeitsprüfungen von Rädern und Radnaben mit gleichbleibender Beanspruchungsamplitude. Die Prüfmethode mit stillstehendem Rad ermöglicht relativ kurze Prüfzeiten und das Beobachten der Rissentwicklung des Prüflings. In der Mitte der Maschine befindet sich ein Biegestab, über den das Biegemoment durch eine rotierende Masse am Unwuchterregerkopf eingeleitet wird. Der Biegestab mit aufgebautem Flansch hat eine standardisierte Länge von 760 mm, die etwa der halben Achsbreite entspricht. Mit diesem Test wird näherungsweise eine Kurvenfahrt mit bis zu 75 % Entlastung der kurveninneren Räder simuliert (Bild 3). Kriterium ist hier die Rissfreiheit im Bereich der Radbefestigung und des Radsterns. Im Regelfall wird auf zwei unterschiedlichen Lashorizonten mit individuellen Anforderungen hinsichtlich einer Mindestschwingspielzahl geprüft; die Berücksichtigung von möglichen Korrosionseffekten bei Aluminiumrädern erfolgt in Form erweiterter Prüfzeitanforderungen.

In der Abrollprüfung werden Scheibenräder mit montierten Reifen auf einer umlaufenden Aussentrommel in radialer Richtung belastet. Hier ist vorrangig die Festigkeit des Rades im Felgenbereich bzw. der Verschraubung Gegenstand der Prüfung, wobei das Prüfkriterium wiederum die Rissfreiheit bzw. ein möglicher Luftverlust aufgrund Felgenschäden ist.

Die im Fahrzeugbetrieb tatsächlich auftretenden veränderlichen Kraftgrößen, die sich in Betrag und Wirkungsrichtung deutlich zu den in der Biegeumlauf- bzw. Abrollprüfung getroffenen Annahmen unterscheiden können, induzieren teilweise ganz andere Schädigungsmechanismen als dies durch die vereinfachten Bauteilprüfungen simuliert werden kann. So ergeben sich gerade bei der Biegeumlaufprüfung aufgrund des dort stillstehenden Rades mit einer im Felgenhornbereich eigentlich atypischen Fixierung vollständig andere Beanspruchungsverhältnisse als bei einem in hochdynamischer Kurvenfahrt rotierendem luftbereiften Fahrzeugrad – wie beispielsweise auch mit Hilfe numerischer Simulationen anschaulich gezeigt werden kann (Bild 4).

Die mit den vereinfachten Prüfverfahren jeweils eng be-

grenzte Aussagekraft hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften in bestimmten Bauteilbereichen erlaubt keine umfassende und vollständige Bewertung des Fahrzeugrades. Damit ist es in der Produktentwicklung kaum möglich zu bewerten, ob das Produkt überhaupt zweckgeeignet ist; aber auch für eine herstellungsbegleitende Endprüfung in Form einer Stichprobenuntersuchung sind diese Verfahren in ihrer Gültigkeit und Wirksamkeit beschränkt.

## ZWARP FÜR DIE QUALITÄTSSICHERUNG

Demgegenüber simuliert die ZWARP-Erprobung eine betriebsähnliche Abfolge fahrphysikalisch begründeter Lasten mit variablen Amplituden – differenziert sich also deutlich von dem beanspruchungsmechanischen Hintergrund der vereinfachten Prüfverfahren (Bild 5).

Der vollständige Betriebsfestigkeitsnachweis von Prototypen und/oder Erstmustern in der ZWARP-Erprobung erfordert die schädigungsäquivalente Übersetzung des Bemessungskollektivs in ein prüfzeitverkürztes Versuchskollektiv. Dieses wird für Typ 1 zensierte Prüfumfänge (Bild 6) mit einer nominellen Versuchslaufzeit abgebildet, die auch aufgrund der möglicherweise im Verschraubungsbereich ausgebildeten Reibermüdungsschäden einen Umfang von deutlich mehr als 106 Schwingspiele aufweist.

Die Prüfrandbedingungen in der Qualitätssicherung sind demgegenüber grundsätzlich anders gestaltet: stichprobenartige Umfänge müssen hier schnell und mit grosser Routine bewertet werden, weshalb vielfach die oben beschriebenen Biegeumlaufprüfeinrichtungen eingesetzt werden. Im Rahmen von Entwicklungsarbeiten am Fraunhofer LBF wurden spezielle, zeitverkürzte Lastprogramme für die ZWARP-Erprobung aufgebaut, die die verfahrensspezifischen Vorteile dieser Prüfeinrichtungen mit der für QS-Maßnahmen notwendigen Flexibilität und Robustheit verknüpfen. Dies bedeutet, die für das Ausfallverhalten primär entscheidenden Schädigungsmechanismen im Rahmen einer deutlich verkürzten Prüfung sicher abzubilden, d.h., die Weibull-Gerade zu geringeren Laufzeiten zu verschieben ohne die Geradensteigung wesentlich zu verändern (Bild 7).

Die Basis für diesen hier beschriebenen QS-Zyklus als ZWARP-Lastprogramm für die Qualitätssicherungsprüfung bildete das bekannte, für PKW-Räder im europäischen Nutzungsumfeld etablierte Standardlastprogramm (LBF Standard PKW Vorderachse – Europazyklus), das beispielsweise für Aluminiumräder innerhalb einer Versuchsdauer von 10.000 km die vollständige, im Produktlebenszyklus erreichte Fahrleistung von 300.000 km simuliert. Diese Versuchsdauer entspricht >5.106 Schwingspielen – ist also hinsichtlich einer für den vollständigen Betriebsfestigkeitsnachweis adäquater Umfang, der bei-

spielsweise im Radverschraubungsbereich auftretende Reibermüdungseffekte ebenfalls zielgerichtet behandeln lässt.

Für im Bereich von Radverschraubung, Radspeiche und Felgentiefbett bzw. –innenhorn angeordnete Dehnungsmessstellen wurden die sich innerhalb einer Lastprogrammrunde entwickelnden Schädigungsbeiträge ermittelt. Damit konnten in einfacher Weise bereits Abschnitte mit relativ geringer Schädigungsentwicklung identifiziert werden, die im Rahmen einer erweiterten Omissionsstrategie zunächst eliminiert wurden (Bild 8).

Die hierdurch implizierten Veränderungen der notwendigen Schwingfestigkeitseigenschaften waren für die Radscheibe im Bereich zwischen 0,5% und 1,7%; lediglich für das Felgeninnenhorn reduzierte sich der RFS-Werte (engl.: *required fatigue strength*) um 5,6% und damit relativ deutlich gegenüber dem Basislastprogramm.

Die verbleibenden Lastsequenzen wurden hinsichtlich deren individueller Schädigung für die einzelnen Messstellen bewertet und in ihrer zeitlichen Abfolge bzw. ihrer Zeitdauer weiter optimiert. Die Randbedingungen hierfür waren, dass die Schadenssumme aus dem verkürzten Lastprogramm bis auf +/- 5% der des Standardlastprogramms entspricht sowie eine minimale Anzahl von 50 Schwingspielen pro Laststufe gewährleistet sein sollte, was bei einer maximalen Prüffrequenz von 20 Hz die Dauer einer Laststufe auf mindestens 2½ Sekunden festlegt.

Ein im Hinblick auf wesentliche Randbedingungen in der experimentellen Erprobung gültiges und deshalb häufig genutztes Beanspruchungskollektiv ist das Kollektiv des stationären Gauß-Prozesses. Tatsächlich können die für die Festigkeit von Rädern und Radnaben massgeblichen Fahrbetriebsbedingungen in solche Verteilungen überführt werden – im speziellen gilt dies in guter Näherung für Kurvenfahrtmanöver [6]. Demgegenüber sind mit Geradeausfahrt assoziierte Fahrbetriebsbedingungen – einschliesslich der Schlechtweganregung – eher einer Geradenlinienverteilung zuzuordnen. Typische Nutzungskollektive für Kraftfahrzeuge finden sich also zwischen diesen beiden Kollektivformen (Bild 9), weshalb die Gaußverteilung auch in der zeitverkürzten Laborerprobung als eine Art Grenzkollektiv mit hinreichendem Abstand zur Fälligkeit eines Wöhlerversuchs gelten kann.

Mit der so beschriebenen grösstmöglichen Versuchszeitverkürzung ohne grundsätzlichen Gültigkeitsverlust in der Betriebslastensimulation konnte angegeben werden, dass eine weitere Verkürzung der Versuchszeit auf etwa die Hälfte der Laufzeit des Omissionsprogramms möglich wäre (Bild 10). Dies beinhaltet in jedem Fall aber eine relativ grosse Anzahl von Höchstwerten im Beanspruchungsablauf – hier mit einer Auftretenshäufigkeit  $\leq 10^{-2}$ .

Mit diesen Randbedingungen kann belegt werden, dass ein die wesentlichen Effekte und Schädigungsmechanismen beschreibendes Blocklastprogramm für die Erprobung in der Zweiaxialen Radprüfeinrichtung einen Prüfumfang von wenigstens 3.000 km haben wird, was dann für die stichprobenartige Prüfung im Rahmen von Qualitätssicherungsprozessen eingesetzt werden kann (Bild 11). Dies entspricht – ohne im Einzelfall vielleicht notwendige Reifenwechsel – einer Versuchszeit von höchstens 30 Stunden und ist damit auch kostenseitig gut darstellbar. Vergleichsweise entspricht dies ziemlich genau der Versuchsdauer einer Einzelprüfung auf einem Radialrollprüfstand nach TÜV Forderung mit <106 Schwingspielen.

Zwei weitere, mit den Stahlrädern 6,5Jx16 durchgeführte Versuche mit dem QS-Lastprogramm bestätigten die Validität dieses Ansatzes – sowohl die Schädigungsmechanismen als auch die mittels Schadensakkumulation prognostizierte Laufzeit zeigten sich in guter Übereinstimmung mit dem Basisprogramm (Bild 12).

Für die produktionsbegleitende Qualitätssicherung können mit diesem speziellen Lastprogramm Stichprobenexperimente durchgeführt werden, die innerhalb eines sehr angemessenen Zeitraums eine hinreichende Beobachtungsdichte für Zuverlässigkeitsanalysen erlaubt.

Gegenüber den vereinfachten Prüfverfahren gewährleistet die ZWARP-Erprobung die Abbildung der wesentlichen Schädigungsmechanismen für das vollständige Rad und macht die Nutzung von zwei unterschiedlichen Prüfeinrichtungen überflüssig. Die hiermit insgesamt erreichbaren Effekte hinsichtlich der qualitätsbezogenen Kosten – einmal für die Prüfmassnahmen und weiterhin für den Fehlleistungsaufwand – sind gegenüber dem konventionellen Ansatz in der Qualitätssicherung von Fahrzeugrädern nicht ganz einfach zu bewerten, im Regelfall aber deutlich positiv. Die direkten Kosten für Mess- und Prüfaufwendungen sind bei der Nutzung einer Zweiaxialen Radprüfeinrichtung im Vergleich zu den beiden anderen Versuchseinrichtungen – unter Berücksichtigung von Kapitalbindung, Abschreibung, Energie- und Personalkosten – nicht wesentlich höher, aber die zeitnahe und sichere Bewertung der Betriebsfestigkeit des kompletten Bauteils wird Fehler- und Fehlerfolgekosten reduzieren helfen und damit für einen deutlich positiven Saldo sorgen.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Zweiaxiale Räderprüfung ist heute Stand der Technik für die Entwicklung und den Befähigungsnachweis von Fahrzeugrädern. Gegenüber den vereinfachten Prüfverfahren wie Biegeumlauf- oder Radialrollprüfung erlaubt die ZWARP-Erprobung realistische Lastkombinationen,

die hinsichtlich der Variabilität von Grösse und Wirkungsrichtung der resultierenden Kraft einem modernen Prüfkonzept in der Betriebslastensimulation entspricht.

Ein für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Prototypen und/oder Erstmustern abgestimmtes Lastprogramm beinhaltet >5.106 Schwingspiele und simuliert die im gesamten Fahrzeuglebenszyklus eingeprägte Schädigung – ist damit also schädigungsäquivalent zum LBF-Bemessungskollektiv im Umfang von 300.000 km für PKW.

Gegenüber der im Betriebsfestigkeitsnachweis genutzten Strategie einer laufzeitensierten Erprobung gestalten sich die Randbedingungen für die Qualitätssicherung etwas anders: Neben der sicheren Aussage über eine hinreichende Festigkeit einzelner Prüflinge aus einem Fertigungslos sind weitere Zuverlässigkeitsmerkmale wie z.B. Schädigungsmechanismen und Bruchlagen sowie Streuspannen der schädigungsfreien Versuchsdauer von hoher Relevanz. Der für die Nutzung in den ZWARP-Laborprüfeinrichtungen entwickelte QS-Zyklus ermöglicht eine mit dem LBF-Bemessungskollektiv korrelierte Prüfung vollständiger Stichproben, die hinsichtlich des dafür nötigen Zeit- und Kostenaufwands durchaus mit den vereinfachten Prüfungen vergleichbar sind.

## LITERATUR

- [1] DIN ISO 8402 (Entwurf 03/92) Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung: Begriffe. Beuth Verlag, Berlin 1992.
- [2] O'Connor, Patrick D. T.: Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons, Chichester 1985. Deutsche Übersetzung: Zuverlässigkeitstechnik - Grundlagen und Anwendungen. VCH Verlagsgemeinschaft, Weinheim 1990
- [3] DIN 40041 (12/90) Zuverlässigkeit: Begriffe. Beuth Verlag, Berlin 1990
- [4] Heim, R., Wallmichrath, M., Herbert, A., Krause, I.: Baugruppenerprobung für straßen- und schienengebundene Räder in der integrativen Simulationsumgebung ZWARP. DVM Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Wolfsburg 2007.
- [5] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. Hanser Fachbuchverlag, München 2001
- [6] Grubisic, V.: General Aspects and Criteria for Fatigue Evaluation of Wheels; Report No. TB-204, Fraunhofer LBF: 1994