

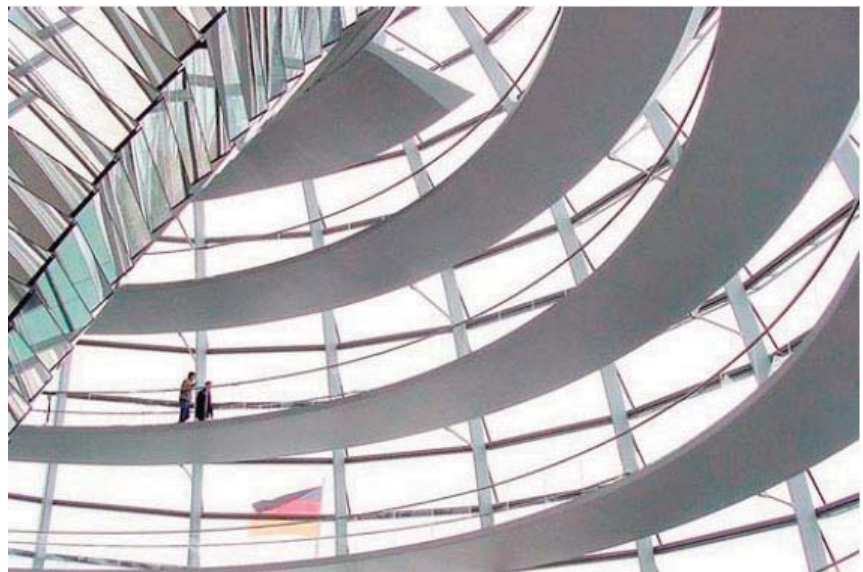


Deutscher Verband für  
Materialforschung und  
-prüfung e.V.

# DVM-Bericht 678

## **Bauteilzuverlässigkeit - Schäden und ihre Vermeidung**

### **DVM-Tag 2011**



04. - 06.  
Mai 2011  
Berlin



DEUTSCHER VERBAND FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG e.V.  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin · Telefon: +49 (0)30 811 30 66 · Fax: +49 (0)30 811 93 59  
E-Mail: [office@dvm-berlin.de](mailto:office@dvm-berlin.de) - [www.dvm-berlin.de](http://www.dvm-berlin.de)

## **DVM-Bericht 678**

# **Bauteilzuverlässigkeit - Schäden und ihre Vermeidung**

## **DVM-Tag 2011**

**Vorträge**

**4. - 6. Mai 2011**

## **Programmausschussmitglieder**

**Prof. Dr.-Ing. C. Berger,**

Staatliche Materialprüfungsanstalt, TU Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. T. Böllinghaus,**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

**Prof. Dr.-Ing. T. Fleischer,**

IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Dresden

**Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka,**

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), Darmstadt

**Dr.-Ing. P. Heuler,**

Audi AG, Ingolstadt

**Prof. Dr. -Ing. L. Issler,**

Steinbeis-Transferzentrum Bauteilsicherheit, Werkstoff- und Fügetechnik (BWF) an der Hochschule Esslingen

**Dipl.-Ing. L. Krüger,**

BMW AG, München

**Prof. Dr.-Ing. G. Lange,**

Institut für Werkstoffe, TU Braunschweig

**Dipl.-Ing. P. Loos,**

TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Filderstadt

**Dr. -Ing. K. Mädler,**

Deutsche Bahn AG, Brandenburg-Kirchmöser

**Prof. Dr.-Ing. M. Pohl,**

Ruhr Universität Bochum

**Prof. Dr. -Ing. H.A. Richard,**

Fakultät für Maschinenbau /Fachgruppe Angewandte Mechanik Universität Paderborn

**Prof. Dr.-Ing. E. Roos,**

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

**Prof. Dr.-Ing. M. Sander,**

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock

**Prof. Dr.-Ing. K.-H. Schwalbe,**

Consulting, Vögelsen

# **FAHRZEUGFEDERN – SCHADENSURSACHEN UND EXPERIMENTELLER BETRIEBSFESTIGKEITSNACHWEIS**

**M. Decker, S. Rödling, J. Fröschl**  
IABG mbH, Ottobrunn

## **Zusammenfassung:**

Federn im Fahrwerk von Fahrzeugen sind entscheidend für Funktion und Fahrverhalten und müssen daher so ausgelegt und experimentell abgesichert sein, daß ein Versagen mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Neben Geometrie, Einbau- und Belastungssituation ist dabei auch die Einhaltung ausreichender Werkstoffreinheit erforderlich, um Schäden im Feld mit ausreichender Sicherheit ausschließen zu können. Die relevanten Schadensbilder und Schadensmechanismen werden beschrieben und geeignete Prüfmethoden für Freigabe und Qualitätssicherung vorgestellt.

**Stichwörter:** Feder, Fahrzeug, Schaden, Betriebsfestigkeit

## **Springs for Vehicles – Failure Modes and Experimental Proof of Fatigue Life**

### **Abstract:**

Springs are of major importance for functionality and handling of vehicles and have to be designed and proofed out experimentally in order to exclude a failure with high reliability. Apart from geometry, installation and load situation, maintaining sufficient purity of the raw material is necessary in order to avoid failures with the required certainty. The relevant types of failure and damage mechanisms are described and testing methods for release and quality assurance are presented.

**Keywords:** spring, vehicle, failure mode, fatigue life

### **1. Einleitung**

Federn finden Einsatz in allen technischen Bereichen und sind als elastisches Element unersetzlich. Mit wenigen Ausnahmen werden in allen PKW druckbelastete Schraubenfedern als Tragfedern im Fahrwerk sowie als Ventildfedern im Motor eingesetzt. Ihre Zuverlässigkeit ist dabei entscheidend für Funktion und Betriebssicherheit des Fahrzeugs. Die Vermeidung von Ausfällen im Fahrbetrieb ist deshalb von größter Relevanz und muß durch ein durchgängiges Auslegungs- und Nachweiskonzept sichergestellt werden.

In diesem Beitrag werden die relevanten Betriebsbelastungen an Fahrwerksfedern sowie typische Schadensbilder dargestellt. Neben einer Beschreibung der Schädigungsmechanismen, die zum Ausfall führen können, wird ein experimentelles Nachweiskonzept aufgezeigt, das neben der Betriebsfestigkeit unter korrosiven Umgebungsbedingungen, abrasivem Verschleiß und Steinschlag auch die Möglichkeit seltener Ausfälle durch Unreinheiten im Werkstoff berücksichtigt.

Der vorliegende Beitrag ist fokussiert auf Schraubenfedern im Fahrwerk von PKW, die Ergebnisse sind aber unter Berücksichtigung ggf. geänderter Randbedingungen übertragbar auf bspw. Blattfedern im Fahrwerk von NFZ oder Ventildfedern im Motor.

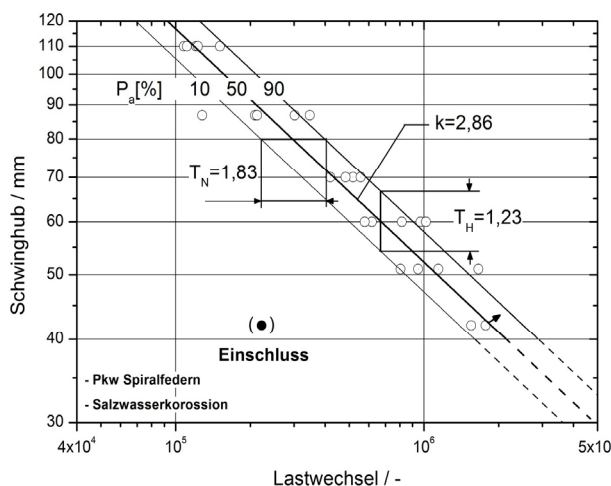
## **2. Werkstoffe, Gestaltung und Einbausituation**

Fahrzeugfedern stellen statisch und zyklisch hoch belastete Bauteile dar. Um die Federmasse gering zu halten bzw. die gewünschte Federcharakteristik im vorgegebenen Bauraum zu realisieren, werden hoch- bzw. höchstfeste Vergütungsstähle wie 52CrMoV4 oder 54SiCr6 mit Zugfestigkeiten von 1400 bis 2000 MPa eingesetzt. Die Federn unterliegen dabei lokal einer hohen Beanspruchung. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, daß die Kerbempfindlichkeit mit steigender Werkstofffestigkeit und steigendem Streckgrenzenverhältnis zunimmt. Das bedeutet, daß Fahrzeugfedern aus hochfesten Werkstoffen deutlich empfindlicher auf Oberflächendefekte reagieren, wie sie etwa bei der Fertigung bzw. dem Einbau aber auch während des Betriebes durch äußere Einwirkung oder Wechselwirkung auftreten können.

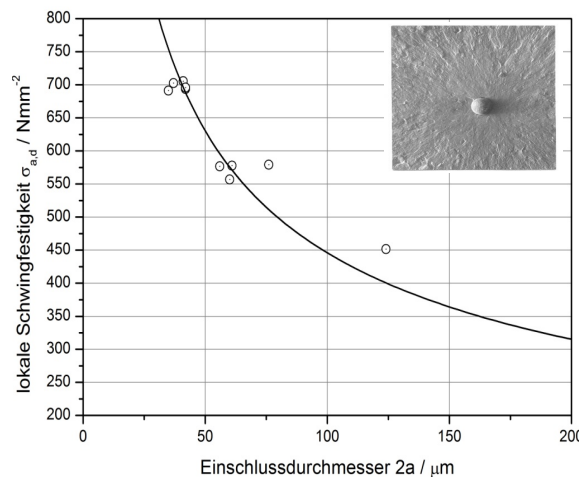
Bei hoch- bzw. höchstfesten Stählen hat die Stahlreinheit einen wesentlichen Einfluß auf die Schwingfestigkeit bei hohen Zyklenzahlen. Herstellungsbedingt treten während des Erstarrungsprozesses lokal Gefügeengänzen bspw. in Form nichtmetallischer Einschlüsse auf. Auf Grund der hohen lokalen Beanspruchung, für die die Federn ausgelegt werden, und daraus resultierender hoher Spannungs- konzentration im Bereich der Fehlstellen können diese initiierend für einen Schwingbruch sein (Bild 1). In [1] wurde durch umfangreiche Untersuchungen an Federstählen ein signifikanter Einfluß der Größe von Gefügeengänzen auf die lokal ertragbare Spannungsamplitude festgestellt (vgl. Bild 2). Für die Auslegung von Fahrzeugfedern aus hochfesten Stählen bedeutet dies, daß der eingesetzte Werkstoff mit Hinblick auf die größten auftretenden Gefügeengänzen umso reiner sein muß, je höher die ausgenutzte Schwingfestigkeit des Werkstoffes bzw. je höher die lokale Beanspruchung ist. Eng gekoppelt mit dieser Problemstellung ist dabei die Frage nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser größten im Werkstoff befindlichen Gefügeengänzen gerade in den hoch belasteten Zonen, in welchen diese schwingrißinitiierend wirken können. Diese Frage läßt sich über entsprechende Betrachtungen zum kritisch beanspruchten Volumen in der Fahrzeugfeder sowie den Überlegungen zum sog. statistischen Größeneinfluß beantworten. Detaillierte Arbeiten hierzu finden sich bspw. in [2].

Ein weiterer Aspekt beim Einsatz hoch- bzw. höchstfester Stähle ist die verstärkte Neigung zur Schwingungsrißkorrosion. Dies muß nicht zwangsläufig mit einer erhöhten Korrosionsneigung des Grundwerkstoffes zusammenhängen, sondern kann auch durch die erhöhte lokale Beanspruchung und die Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes verursacht sein. Um die Gefahr der Schwingungsrißkorrosion zu mindern, kommen unterschiedliche Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz. Dabei haben diese Beschichtungen sowohl einen grundsätzlichen Korrosionsschutz des Federdrahtes aber auch einen Schutz gegenüber mechanischer Einwirkung wie bspw. durch Steinschlag zu erbringen.

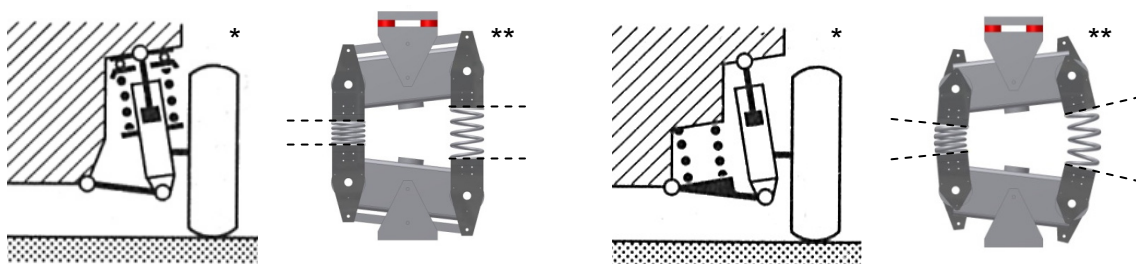
Die lokale Beanspruchung einer Fahrzeugfeder wird neben der geometrischen Gestaltung wesentlich geprägt von der Achskinematik sowie der konstruktiven Ausgestaltung und Beschaffenheit der Federauflage. Während sich die Federauflagen bei McPherson-Federbeinen ohne Winkeländerung geradlinig auf einander zu bewegen (Paralleleinfederung), kommt es bei üblichen Hinterachsaufhängungen über den Einfederweg zu einer zusätzlichen Kippbewegung und Verschiebung der Auflageflächen der Feder zueinander (Systemeinfederung, vgl. Bild 3). Parallel- und Systemeinfederung führen dabei zu unterschiedlichen lokalen Beanspruchungen in der Feder, was sowohl bei experimentellen als auch bei rechnerischen Betriebsfestigkeitsbewertungen berücksichtigt werden muß. Die Ausgestaltung der Federauflage bzw. der ersten Windung der Feder hat wesentlichen Einfluß sowohl auf die Verteilung der Oberflächenpressung in der Kontaktzone als auch auf die Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern und damit auf die Betriebsfestigkeit des gesamten Federsystems. Besonders zu berücksichtigen sind Federn, die konstruktionsbestimmt im Betrieb ganz oder teilweise bis auf Block einfedern können, da hier in den Kontaktzonen zum einen der Oberflächenschutz beschädigt wird und zum anderen mechanische Oberflächen-defekte erzeugt werden, die rißinitierend wirken können.



**Bild 1: Gefügeungänge als mögliche Schadensursache für einen Federbruch [2]**  
*Failure caused by discontinuity of microstructure (inclusion)*



**Bild 2: Einfluß der Einschlussgröße auf die lokale Schwingfestigkeit [1]**  
*Influence of size of non-metallic inclusions on local fatigue limit*

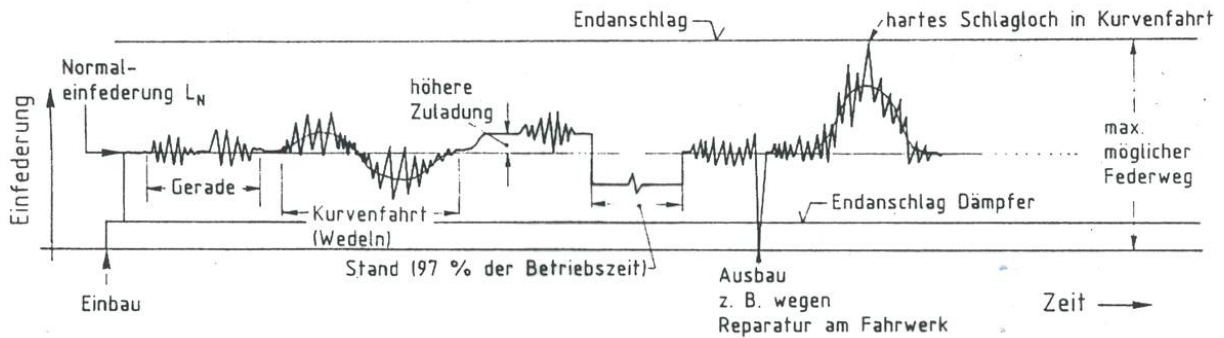


**Bild 3: Federkinematik bei Parallel- und Systemeinfederung in Fahrwerk und Prüfstand (\* aus [3]; \*\* IABG)**  
*Kinematics of spring with parallel and circular deflection in car suspension and test facility*

### 3. Betriebsbelastungen

Neben Geometrie, Werkstoff, Fertigung und Einbausituation bestimmen die im Betrieb wirkenden Belastungen und Umgebungsbedingungen die Lebensdauer einer Feder maßgeblich.

Die mechanische Belastung der Federn kann hier in eine statische Vorlast und in die überlagerte Schwingbeanspruchung unterteilt werden. In Bild 4 sind die wichtigsten Belastungsarten über den Lebenszyklus einer Feder schematisch dargestellt.



**Bild 4: Schematischer Lastablauf an PKW Fahrwerksfedern [4]**  
*Schematic loading of suspension springs of passenger cars*

Durch die konstruktive Auslegung sind maximale und minimale Einfederung bestimmt. Die statische Vorlast ergibt sich aus der Vorspannung durch Einbau sowie das von der Zuladung abhängige Fahrzeuggesamtgewicht. Hierdurch ergibt sich eine Verschiebung der Mittellast, die während der Fahrt auftretenden Schwingbeanspruchung aus Straßenanregung und Fahrmanövern. Bei einer schätzungsweise Stillstandszeit privat genutzter PKW von ca. 97% der Gesamteinsatzdauer sind die Phasen mit zu berücksichtigen, in denen die Feder einer rein statischen Belastung unterliegt, insbesondere in Bezug auf Spannungsrißkorrosion.

Die Schwingbeanspruchung in Form zeitlich veränderlicher äußerer Belastung setzt sich aus den unterschiedlichsten Lastfällen zusammen (Bild 4). Von der normalen Geradeausfahrt mit relativ niedrigen Belastungsamplituden, über Verschiebungen der Mittellast durch Kurvenfahrten und höhere Zuladungen, bis hin zu Überlasten durch Schlaglöcher oder Bodenwellen, in denen ein Durchfedern bis zum Endanschlag möglich ist. Durch Kombination verschiedener Belastungsarten wie Schlaglochdurchfahrt während einer Bremsung oder einer Kurve können deutlich höhere Federwege auftreten, als durch die jeweiligen Einzelereignisse. Um verwertbare Aussagen über die Häufigkeit und Größe der auftretenden Beanspruchungen zu erhalten, werden in der Regel Fahrbetriebsmessungen auf für den jeweiligen Einsatzzweck repräsentativen Teststrecken durchgeführt. Die auf diese Weise ermittelten Kollektive sind unter Zugrundelegung typspezifischer Annahmen auf eine entsprechende Auslegungsstrecke zu extrapolieren (vgl. [5]).

Neben der bestimmungsgemäßen mechanischen Belastung wirken auf Federn Umwelteinflüsse ein, die in erheblichem Umfang die Lebensdauer beeinflussen. Die wichtigsten sind hier korrosive Umgebungsbedingungen, Vorschädigung durch Steinschlag und abrasiver Verschleiß [4].

Fahrwerksfedern sind in unseren Breiten stark korrosiven Umgebungseinflüssen ausgesetzt. Diese reichen von normaler Feuchtigkeit über Spritzwasser bis hin zu Salznebel und Salzwasser. Dabei werden die Federn während des Betriebs mit korrosivem Medium benetzt und trocknen unter Temperatureinfluß oder durch den Fahrtwind. Im Fall von Salzwasser können sich sogar Salzkrusten bilden. Temperatureinflüsse können den Korrosionsangriff noch zusätzlich begünstigen.

Insbesondere Hinterachsfedern können während des Betriebs Steinschlägen ausgesetzt sein. Auf der Fahrbahn liegende Steine verschiedener Größen werden durch das Rad oder andere Einflüsse in den Radkasten befördert und können die Feder direkt oder indirekt treffen. Dieser Beschuß mit Rollsplit und teils scharfkantigen Steinen kann die Beschichtung der Feder beschädigen und im Extremfall eine Kerbe in der Oberfläche der Feder erzeugen.

Die Fahrwerksfedern sind im Fahrzeug zwischen dem oberen und unteren Federteller durch das Fahrzeuggewicht über die gesamte Einsatzdauer verspannt. Durch die Betriebsbelastung wird die Feder zusätzlich mit unterschiedlichen Amplituden be- und wieder entlastet. An den Kontaktpunkten zwischen den Federenden und den Federauflagen kommt es dabei durch Relativbewegungen zu abrasivem Verschleiß, der den Oberflächenschutz bis auf das Grundmaterial der Feder abtragen und somit freie Angriffsflächen für Korrosion bilden kann.

Die dargestellten Einflußgrößen auf die Lebensdauer von PKW-Tragfedern beeinflussen sich teilweise stark und müssen als Komplexbelastung betrachtet und abgeprüft werden. Abrasiver Verschleiß durch Relativbewegung in der Federauflage sowie Steinschlag führen zur Beschädigung des Oberflächenschutzes und begünstigen die Korrosion maßgeblich. Der hierdurch bedingte Abfall der ausnutzbaren Festigkeit kann nur in kombinierten Schwingversuchen ermittelt werden.

Neben den hier dargestellten Belastungen an Schraubenfedern im PKW Fahrwerk sind in anderen Einsatzbereichen ggf. zusätzliche Einflüsse zu berücksichtigen, wie bspw. mehrachsige Belastungszustände bei Blattfedern im NFZ Fahrwerk oder erhöhte Umgebungstemperaturen bei Ventildedern.

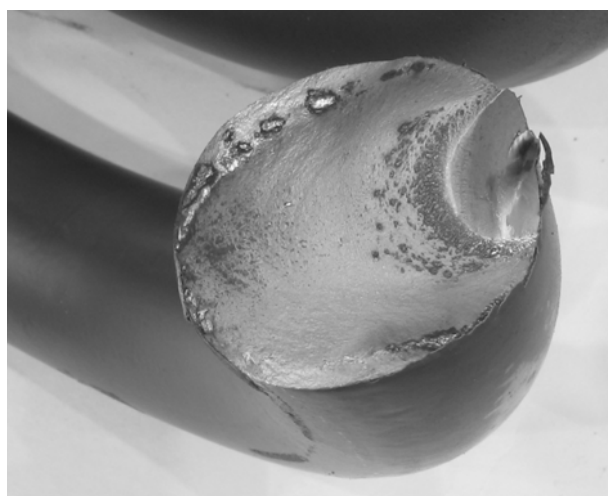
#### **4. Schadensbilder**

Fahrzeugfedern weisen verschiedene typische Schadensbilder auf, deren Ursachen zum einen in der Herstellung, zum anderen in den Betriebsbelastungen liegen. Oft beruhen Schäden auch auf einer Kombination mehrerer Ursachen und Einflüsse. Neben möglichen Setzerscheinungen, die hier nicht näher betrachtet werden, treten im Betrieb Verschleiß, Korrosion sowie Anrißbildung auf. Letztere führt in der Regel zum Bruch der Feder.

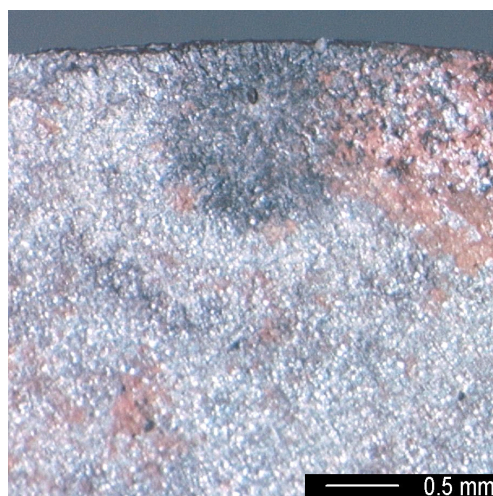
Die häufigste Schadensart an Fahrwerksfedern im Betrieb und im Versuch sind Schwingbrüche ausgehend von der Bauteiloberfläche, da hier die höchste örtliche Beanspruchung wirkt. Wegen der hohen Beanspruchungen in den eingesetzten hochfesten Werkstoffen können hier kleine Oberflächendefekte aus Fertigung, Montage und Betrieb eine Anrißbildung begünstigen oder selbst als Anriß wirken (Bild 5).



Daneben können Schäden aber auch von metallurgischen Fehlern wie z.B. nichtmetallischen Einschlüssen ausgehen, die in jedem Werkstoff vorhanden sind und bei Lage in hochbeanspruchten Zonen wie ein innerer Anriß wirken können (Bild 6). Durch die Ausnutzung des Potentials der Beanspruchbarkeit hochfester Werkstoffe ergeben sich an solchen Fehlstellen hohe Spannungsintensitäten, die zu einem Rißwachstum bis zum Bruch der Feder führen können. Über Schwingbrüche ausgehend von nichtmetallischen Einschlüssen wird sowohl an Schraubenfedern [6] als auch an Blattfedern [7] berichtet. Diese Federbrüche fallen in der Regel aus der Verteilungsfunktion der Brüche heraus, die durch reine Ermüdung auftreten (Bild 1). Diese Brüche dürfen dabei nicht als „Ausreißer“ deklariert sondern müssen mit geeigneten statistischen Methoden bewertet werden, um deren Einfluß auf die Ausfallrate in der Serie abschätzen zu können [2].



**Bild 5: Schwingbruch einer Fahrwerksfeder ausgehend von der Oberfläche [8]**  
*fatigue fracture of suspension spring from surface*

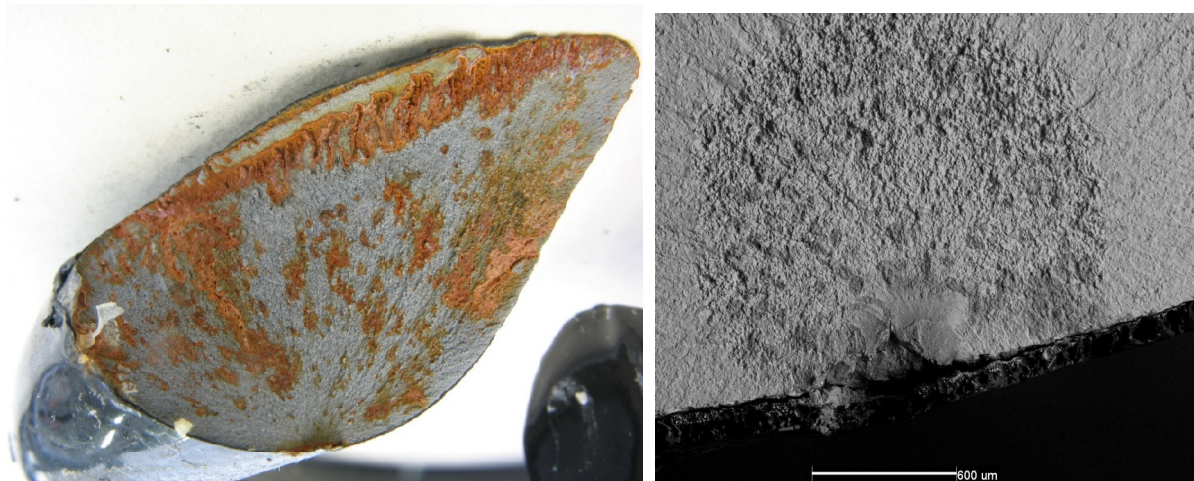


**Bild 6: Schwingbruch an Schraubenfeder ausgehend von nichtmetallischem Einschluß**  
*fatigue fracture of coil spring initiated by non-metallic inclusion*

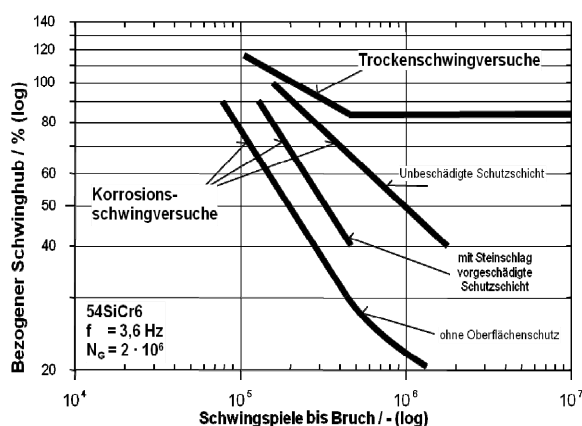
Die harten Umwelteinflüsse im Betrieb können sich stark negativ auf die Lebensdauer einer Fahrzeugfeder auswirken. Steinschlag, korrosive Umgebung und abrasiver Verschleiß im Auflagebereich können die Bildung wachstumsfähiger Risse begünstigen und zu einem Ausfall führen. Bild 7 zeigt den Bruch einer Fahrwerksfeder, deren Korrosionsschutz durch Steinschlag beschädigt wurde. Unter den Umgebungsbedingungen mit salzhaltiger Feuchte konnte sich eine Korrosionsnarbe bilden, die als Auslöser des Schwingbruchs identifiziert werden konnte. Die signifikante Auswirkung dieser Einflüsse auf die Schwingfestigkeit hochfester Federn zeigt sich in einer Gegenüberstellung der Wöhlerlinien in Bild 8, bei denen Federn in trockener Laborluft sowie in korrosiver Umgebung getestet wurden, wobei systematisch der Einfluß einer ggf. beschädigten Korrosionsschutzschicht untersucht wurde. Die korrosive Umgebung wurde dabei realitätsnah durch intermittierendes Besprühen mit einer 5%-igen NaCl-Lösung und zwischengeschaltete Trocknungsphasen dargestellt. Die Beschädigung der Schutzschicht wurde durch einen IABG-Steinschlagsimulator erzeugt, indem die Federn mit definierten Parametern mit Rollsplit beschossen wurden. Die Parameter wurden dabei so abgestimmt, daß zum einen realistische Situationen nachgestellt werden und zum anderen das Schadens-

bild mit typischen Feldrückläufern korreliert. Die Schwingfestigkeitsversuche wurden auf IABG Resonanzfederprüfmaschinen durchgeführt (Bild 9).

Der Vergleich zeigt, daß die Schwingfestigkeit in korrosiver Umgebung um ca. Faktor 2 gegenüber der unter trockener Raumluft absinkt. Zudem ist bis zur Grenzsingpielzahl der Versuche von  $2 \cdot 10^6$  keine Dauerfestigkeit erkennbar. Durch eine unverletzte Korrosionsschutzschicht läßt sich dieser negative Einfluß teilweise kompensieren. Es wird aber auch deutlich, daß eine lokale Beschädigung der Schutzschicht durch Steinschlag diese Verbesserung wieder weitgehend aufhebt. Eine Schwingfestigkeitsprüfung unter trockenen Laborbedingungen kann also bestenfalls für Voruntersuchungen zur Bewertung des Werkstoffs und der Bauteilgeometrie sowie zur Optimierung von Fertigungsparametern dienen. Für eine Freigabeprüfung für den Einsatz im Fahrwerk von Straßenfahrzeugen ist eine Simulation der Umgebungsbedingungen unerlässlich.



**Bild 7: Schwingbruch an Schraubenfeder ausgehend von Korrosionsnarbe [8]**  
*fatigue fracture coming from corrosion pit*



**Bild 8: Einfluß von Korrosion und Vorschädigung auf die Schwingfestigkeit von Fahrwerksfedern (schematisch nach [9])**  
*Influence of corrosion and pre-damage on fatigue behaviour of suspension springs (schematically)*



**Bild 9: Resonanzfederprüfstand zur Durchführung von Schwingfestigkeitsversuchen unter korrosiver Umgebung**  
*Corrosion Spring Tester*

## 5. Experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis

Ein experimentelles Nachweiskonzept für Fahrwerksfedern muß alle Versagensarten mit der erforderlichen Sicherheit abprüfen und ausschließen. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Versuchen zur Qualifikation des Werkstoffs bzw. der Halbzeuge und solchen für den Betriebsfestigkeitsnachweis der Feder in ihrer Einbausituation im Fahrzeug.

Für den Nachweis der Eignung des Werkstoffs bzw. des Halbzeugs sind neben den klassischen Versuchen zur Ermittlung der statischen und ggf. dynamischen Kennwerte aus Sicht der Autoren spätestens zur Serienfreiprüfung und in der Qualitätssicherung der laufenden Serie auch Schwingfestigkeitsversuche an Proben mit hohem kritisch beanspruchtem Volumen erforderlich, um die Einhaltung der erforderlichen Materialreinheit zu gewährleisten. In den Bild 1 zugrundeliegenden Versuchen ging von 120 Brüchen ein einziger von einem nichtmetallischen Einschluß aus. Bei ansonsten sicher ausgelegten Federn würde dies bei 4 Federn pro Fahrzeug einfach hochgerechnet eine sicherlich nicht akzeptable Ausfallrate von über 3% bedeuten. Um diese Ausfälle auszuschließen, sind Bauteilversuche an Federn nicht geeignet, da wegen der inhomogenen Spannungsverteilung nur ein sehr kleines Volumen jeder Feder so hoch beansprucht wird, daß ein zufällig dort liegender Einschluß rißinitiierend sein kann.

Ein einziger Schwingfestigkeitsversuch an einer Probe mit hohem kritisch beanspruchtem Volumen kann je nach Probenform und Beanspruchungsart bezüglich des Auffindens kritischer Inhomogenitäten genauso effektiv sein wie 50 Bauteilversuche an Federn. Laufzeiten und Kosten jedes einzelnen Probenversuchs sind zudem deutlich geringer als ein Bauteilversuch. Der Nachweis ist unabhängig von der konstruktiven Gestaltung der Feder und eignet sich somit für eine Qualitätsprüfung auf Lieferantenseite. Der in gängigen Liefervorschriften geforderte Nachweis durch Auswertung von Schlißbildern ist hierzu aus statistischen Gründen nicht zielführend [2].

Der Nachweis der Betriebsfestigkeit für die Freigabe einer Fahrwerksfeder ist nach heutigem Kenntnisstand und Ansicht der Autoren nur in einem Schwingfestigkeitsversuch mit Nachbildung der Einbaubedingungen (originale Federauflagen, räumliche Orientierung wie im Fahrzeug), der Beanspruchungssituation (Federkinematik) sowie der relevanten Umgebungsbedingungen (korrosive und abrasive Medien) sinnvoll. Zudem muß je nach Einbausituation eine Vorschädigung der Korrosionsschutzschicht durch Steinschlagsimulation durchgeführt werden, um zu einem Ergebnis zu gelangen, das für die Abschätzung der Betriebsfestigkeit der Feder unter realen Einsatzbedingungen relevant ist.

Die Prüfung von Fahrwerksfedern in einem Achsprüfstand unter Korrosion ist dabei zu aufwendig, da die Darstellung korrosiver Umgebungsbedingungen bei diesen meist mehrkanaligen Versuchsanlagen mit großen Schwierigkeiten verbunden ist und die Betriebskosten der in der Regel servohydraulisch betriebenen Anlagen sehr hoch liegen. Eine kostenoptimierte Lösung bieten Resonanzfederprüfstände mit Simulation der Achskinematik sowie korrosiver Umgebungsbedingungen durch intermittierendes Besprühen mit Salzwasser, die mit einem minimalen Aufwand an

Versuchsvorbereitung, Energie und Stellfläche alle für die Schwingfestigkeits-erprobung einer Fahrwerksfeder relevanten Einflüsse abbilden können (vgl. Bild 9).

Anzahl der Prüflinge, Prüfprogramme sowie Vorgaben zur statistischen Auswertung der Versuche sind entsprechend dem Einsatzprofil der Fahrzeuge und abhängig von der nachzuweisenden Ausfallsicherheit festzulegen, wobei diese Parameter je nach den möglichen Schadensfolgen variieren können.

Die deutschen Automobilhersteller haben hierzu in einem Arbeitskreis ein Rahmenwerk für ein durchgängiges Berechnungs- und Erprobungskonzept von Fahrzeugtragfedern geschaffen [10]. Ergänzend sollte aus Sicht der Verfasser die Qualifikation des Vormaterials durch Schwingfestigkeitsversuche zur sicheren Bewertung der Materialreinheit sowie die Simulation des abrasiven Verschleißes in der Federauflage aufgenommen werden. Ein Abgleich der entsprechenden neuen Prüfparameter an Ergebnissen aus Feldrückläufern ermöglicht dabei eine angepaßte Erprobung mit Ergebnissen, die für den tatsächlichen Fahrbetrieb repräsentativ sind.

Je nach Untersuchungsziel können zwischen den Werkstoff- bzw. Halbzeugversuchen an Proben und den Bauteilversuchen an fertigen Federn Grundsatzuntersuchungen an bauteilähnlichen Proben sinnvoll sein. Hierfür bieten sich 360°-Abschnitte aus zylindrischen Schraubenfedern an, die in geeigneter Weise eingespannt und belastet werden. Mit diesen bauteilähnlichen Proben können auf Federwindungsprüfständen losgelöst von einer konkreten Bauteilgeometrie Versuche an Federwindungen unter realitätsnahen Beanspruchungszuständen und Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Hiermit lassen sich Grundsatzuntersuchungen zur Bewertung und Optimierung von Werkstoff, Wärmebehandlung, Oberflächenversfestigung und Korrosionsbeständigkeit ebenso durchführen wie Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Mittelspannung und Prüffrequenz. Die Probenform kann dabei über die Jahre gleich gehalten werden, so daß über längere Zeiträume vergleichbare und übertragbare Ergebnisse generiert werden.

## **6. Fazit und Ausblick**

Es wurde aufgezeigt, daß für einen sicheren Nachweis der Betriebsfestigkeit von Fahrzeugfedern neben Schwingfestigkeitsversuchen an Federn in Ihrer Einbausituation und unter betriebsnahen Umgebungsbedingungen auch ergänzende Versuche zum Nachweis gleichbleibender Werkstoff- und Halbzeugqualität erforderlich sind. Nur so können sowohl das Potential hoch- und höchstfester Federwerkstoffe im Sinne der Gewichtsreduzierung voll ausgeschöpft als auch Schäden im Feld mit der erforderlichen Sicherheit ausgeschlossen werden. Entsprechende Forderungen sollten aus Sicht der Autoren in Qualitätsvorschriften einfließen und die gängigen Methoden zum Nachweis der Werkstoffreinheit in Freigabe und Qualitätssicherung ergänzen.

## 7. Literatur

- [1] Georges, T.: Zur Gewichtsreduzierung von Fahrzeugfedern unter besonderer Beachtung des schwingfestigkeitsmindernden Einflusses bruchauslösender Fehlstellen im Halbzeug Federdraht (Bde. Reihe 5, Nr. 593). VDI Fortschritts-Bericht, 2009
- [2] Rödling, S., Fröschl, J., Hück, M. , Decker, M.: Einfluß nichtmetallischer Einschlüsse auf zulässige HCF-Bemessungskennwerte, DVM 37. Tagung Betriebsfestigkeit, München, 2010
- [3] Radaufhängungen der Vorderachse, In: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Hrsg.: Robert Bosch GmbH, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984, S. 480
- [4] Hück, M., Bergmann, J. W.: Bewertung der Schwingfestigkeit federnder Elemente im Fahrzeugbau, DVM Tag 1994 – Die Feder, Berlin, 1994
- [5] Schnattinger, H., Beste, A.: Auslegung von Pkw-Schraubenfedern aus der Sicht der Betriebsfestigkeit, DVM Tag 1994 – Die Feder, Berlin, 1994
- [6] Mayer, K.-H.: Federbrüche und Ihre Beurteilung, TAE Seminar Fahrzeugfedern, Ostfildern-Nellingen, 17.-18.03.2009
- [7] Kaiser, B.: Randschichtzustand und Schwingfestigkeit von Parabelfedern, , DVM Tag 1994 – Die Feder, Berlin, 1994
- [8] Hoffmann, S.: Prüfmethode für die Entwicklung und Qualitätssicherung von Fahrzeugfedern, VDMA Mitgliedertagung Prüfmaschinen, Ottobrunn, 07.10.2010
- [9] Hück, M., Decker, M.: Grundsatzuntersuchungen über die Betriebsfestigkeit von Achsfedern, IABG-Bericht B-TA-3903, Ottobrunn, 2003
- [10] Federn und Stabilisatoren, Arbeitskreis-Lastenheft AK-LH 07, Index h, Arbeitskreis der Firmen Audi AG, Bayerische Motoren Werke AG, Daimler AG, Porsche AG, Volkswagen AG, 12/2006