

## Bemessungsrelevante Eingangsgrößen

# Höheres Leichtbau- und Einsatzpotenzial praxisrelevanter Schmiedewerkstoffe

Die Substitution von Materialien höherer gegen solche geringerer Dichte im Leichtbau ist in den meisten Fällen weder wirtschaftlich noch technisch optimal. Sie ist oft auch nicht zielführend, da ein Werkstoffwechsel in aller Regel auch die Beachtung vieler anderer Werkstoffeigenschaften mit sich bringt. Vielmehr sind es für zyklisch beanspruchte Bauteile die detaillierten Kenntnisse zu den Betriebsbelastungen und zum bauteilgebundenen Werkstoffverhalten, die in einer frühen Entwicklungsphase für die Bauteilbemessung vorhanden sein müssen, um so optimierte Produkte entwickeln zu können.

Die Reduzierung von Entwicklungskosten, schonender Umgang mit Ressourcen und die Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes durch Gewichtseinsparung bei der Verwendung von leichtbauoptimierten Schmiedebauteilen aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen werden durch Steigerung der Festigkeit und der Materialausnutzung realisiert. Sie sind die Grundlage für konkurrenzfähige Produkte. Betriebsfeste Bauteile müssen während ihrer zugeordneten Lebensdauer ein Spektrum von Beanspruchungen zuverlässig

ertragen, ohne zu versagen. Um bei einer betriebsfesten Bemessung den Leichtbau im Produkt umzusetzen, müssen wesentliche, die Lebensdauer beeinflussende Parameter (Werkstoff, Bauteilgeometrie, Fertigungstechnik und Belastung, einschließlich Umweltbelastung) bereits in einer frühen Entwicklungsphase zutreffend berücksichtigt werden, damit die Anforderungen an einen wirtschaftlichen Entwicklungs- und Fertigungsprozess erfüllbar sind. Dies erfordert einerseits die Kenntnis der Betriebsbelastung für die geforderte



»Bemessungsrelevante Eingangsgrößen sind die unverzichtbare Basis für eine effiziente Entwicklung zyklisch und dynamisch hochbeanspruchter Schmiedebauteile.«

Dr.-Ing. Heinz Kaufmann ist Leiter der Abteilung Werkstoffe und Bauteile im Bereich Betriebsfestigkeit am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt.

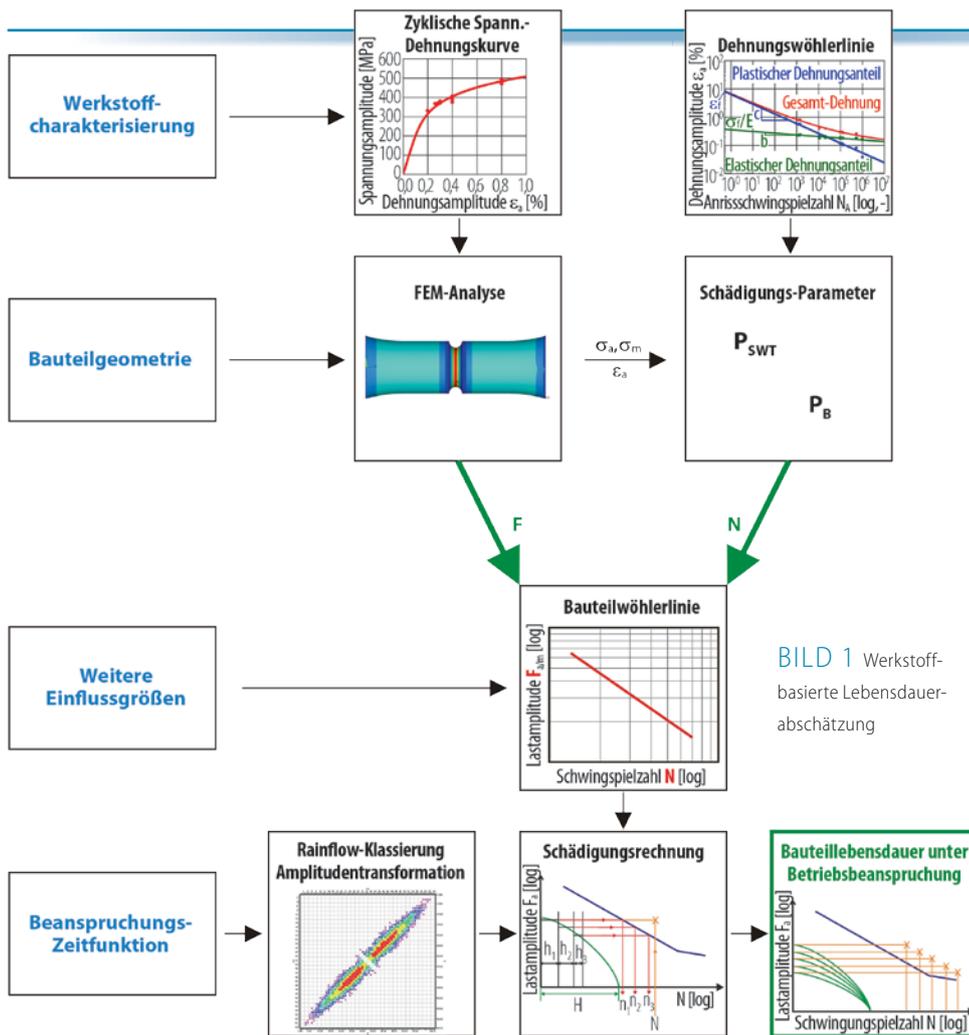


BILD 1 Werkstoffbasierte Lebensdauerabschätzung

sowohl bezüglich der Schwingfestigkeitseigenschaften als auch des Verhaltens bei schlagartiger Belastung unter unfallähnlichen Situationen (Sonderbelastungen, Missbrauch), die bei der Bemessung von Fahrwerksbauteilen häufig berücksichtigt werden müssen.

Im Rahmen von zwei öffentlich geförderten Projekten [2, 3] wurde daher die Eignung der AFP-Stähle 30MnVS6+Ti BY und 18MnVS5 BY im Vergleich zum Vergütungsstahl 38MnB5 V bezüglich ihres möglichen Einsatzes als Fahrwerksbauteile anhand der Beispiele Lenkhebel und Achsschenkel überprüft. Parallel hierzu wurden für den Schmiedewerkstoff 42CrMo4 V und die Aluminium-Knetlegierung EN AW-6082 T6 spannungs- und dehnungsbasierte Konzepte zur betriebsfesten Bauteilbemessung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Abschätzungsgüte bei der Bemessung

Bemessungslebensdauer, die Verfügbarkeit belastbarer Schwingfestigkeitskennwerte sowie geeignete Methoden, um die Kennwerte auf Bauteile zu übertragen und damit eine rechnerische Lebensdauerabschätzung durchführen zu können. Relevante Eingangsgrößen und zutreffende numerische Bemessungsmethoden erlauben, in einer verfügbaren und begrenzten Entwicklungszeit optimierte Bauteile hervorzubringen und sowohl werkstoff- als auch umformtechnische Potenziale im Sinne des Leichtbaus [1] zu heben und Entwicklungsschleifen einzusparen.

WERKSTOFFE UND BAUTEILE

AFP-Stähle sind seit einigen Jahren vermehrt im Serieneinsatz. Durch eine geeignete Temperaturführung aus der Schmiedehitze kann bei dieser Werkstoffgruppe auf eine nachfolgende Wärmebehandlung verzichtet werden, was durch die einhergehende Energieeinsparung zu einer merklichen Reduktion der Herstellungs- und Produktkosten führt und sich damit in der Großserienproduktion, zum Beispiel im Nutzfahrzeugbau, auszahlt. Aus wirtschaftlichen Gründen ist daher eine weitere Verbreitung von Werkstoffen dieser Herstellungstechnologie anzustreben. Insbesondere bei betriebsfest zu bemessenden Sicherheitsbauteilen bestanden bezüglich der Festigkeitseigenschaften noch Unsicherheiten im Vergleich zum großen Erfahrungsschatz mit den jahrzehntelang praxisbewährten Vergütungsstählen. Dies hat zu Vorbehalten in der Anwendung der AFP-Stähle geführt,

sung von zyklisch beanspruchten Schmiedebauteilen aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen untersucht. Der Fokus lag darauf, mit wenig Eingangsgrößen eine hohe Abschätzungsgüte zu ermöglichen. Für die praktische Anwendung wurden in Form eines Leitfadens Empfehlungen für die Bemessung von Bauteilen zusammengestellt.

ERMITTLUNG ZYKLISCHER KENNWERTE

Die Ableitung eines Konzepts zur Bauteilauslegung erfordert experimentelle Kennwerte, die die werkstoff-, konstruktions-, fertigungs- und belastungsspezifischen Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit von Schmiedebauteilen berücksichtigen. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen an Proben und Bauteilen aus den genannten Werkstoffen [2, 3] durchgeführt und das zyklische Werkstoffverhalten ermittelt:

- Größeneinfluss und Einfluss der Mittelspannung aus kraftgeregelten Versuchen mit Proben und Bauteilen unterschiedlicher geometrischer Konfiguration bei wechselnder und zugschwellender Belastung
- zyklisches Werkstoffverhalten, beschrieben durch die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen oder Incremental-Step-Tests sowie durch die Dehnungswöhlerlinie
- Werkstoffverhalten unter Betriebsbelastung mittels dehnungsgeregelter Versuche mit Kollektiven ohne (Gauß) und mit Mittelspannungsschwankungen (Betriebslasten).

## BEMESSUNGSKONZEPT FÜR SCHMIEDEBAUTEILE UND VERIFIKATION

Die bisher verwendeten Bemessungskonzepte sind vielfältig, oftmals sehr komplex und können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen bei den rechnerisch ermittelten Lebensdauern beziehungsweise den ermittelten ertragbaren Beanspruchungen führen. Durch die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Bauteilauslegung und der Werkstoffauswahl bleibt Optimierungspotenzial hinsichtlich der Entwicklungs- und Herstellungskosten und möglicher Gewichtseinsparungen häufig unerschlossen. Ebenso wird bei der Bewertung von Bauteilfestigkeiten so auch die Darstellbarkeit von Vorteilen gegenüber Konkurrenzprodukten beeinflusst. Das hier vorgestellte Konzept zielt darauf ab, eine Interaktion zwischen äußeren Lasten als Eingangsgrößen und lokalem Werkstoffverhalten in Form des Kerbdehnungskonzepts und somit einer werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung herzustellen, wobei der Aufwand für die Kennwertermittlung gering bleiben soll, **Bild 1**.

Die Basis bietet in diesem Fall die Dehnungswöhlerlinie des potenziellen Werkstoffs, die in eine Schädigungsparameter-Wöhlerlinie, zum Beispiel PSWT (Smith, Watson, Topper) oder PB (Bergmann) überführt werden kann. Über die Bauteilgeometrie ist es dann im

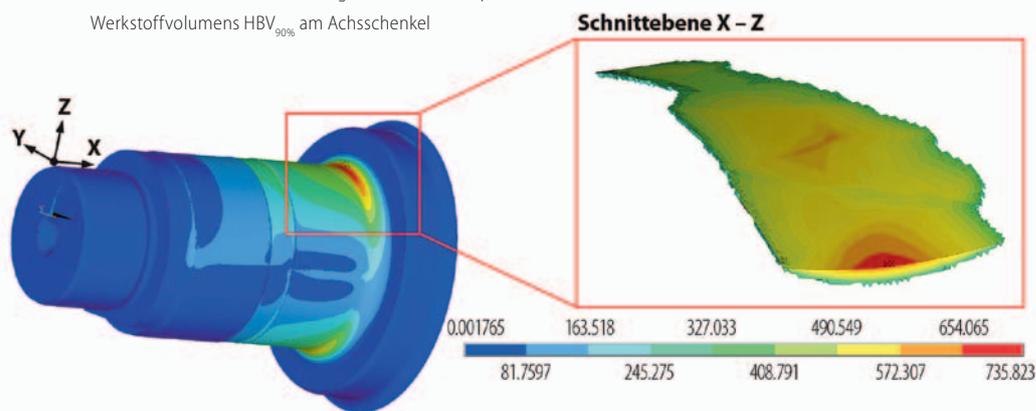
Rahmen einer elasto-plastischen Rechnung möglich, Kraft-Schwingzahl-Stützpunkte aus der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie unter Berücksichtigung am Bauteil vorliegender Mittelspannungen abzuleiten und über eine Regressionsrechnung die Bauteilwöhlerlinie abzuleiten (Kraft vs. Schwingzahl). Hierzu kann die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (zyklisch stabilisiertes Werkstoffverhalten) aus dem Einstufenversuch oder aus dem Incremental-Step-Test verwendet werden.

Die so abgeleitete Bauteilwöhlerlinie hat den Vorteil, dass ihr das Versagenskriterium „Technischer Anriss“, entsprechend der zugrunde liegenden Dehnungswöhlerlinie zugeordnet werden kann. Gegen dieses Kriterium werden üblicherweise Sicherheitsbauteile im Bereich Automotive bemessen. Weiterhin wird in dieser Wöhlerlinie im Bereich hoher Kräfte das lokale elasto-plastische Werkstoffverhalten des Bauteils unter Berücksichtigung makroskopischer Stützeffekte abgebildet. In diese Bauteilwöhlerlinie können noch der spannungsmechanische und statistische Größeneinfluss als Funktion der Lebensdauer integriert werden, zum Beispiel über das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen  $HbV_{90\%}$  [4], beispielhaft in **Bild 2** für den Achsschenkel dargestellt, oder Einflüsse aus abweichenden Werkstofffestigkeiten oder Randschichtzuständen im Bereich höherer

Schwingzahl einfließen. Diese Wöhlerlinie bietet wiederum die Möglichkeit der Lebensdauerabschätzung für variable Belastungsamplituden mit einer Schadensakkumulationshypothese, wobei hier idealerweise über Versuche unter variablen Amplituden (Gaßnerversuche) abgeleitete charakteristische Schadensummen  $D_c$  verwendet werden sollten.

Die so abgeleitete Bauteilwöhlerlinie befindet sich schon im Kraft-Lebensdauer-System und ist somit konform zu Anforderungen aus Las-

**BILD 2** FE-basierte Ermittlung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens  $HbV_{90\%}$  am Achsschenkel



»Das hier vorgestellte Konzept zielt darauf ab, eine Interaktion zwischen äußeren Lasten als Eingangsgrößen und einer werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung herzustellen.«

Dr.-Ing. Martin Küppers ist Teamleiter Betriebsfestigkeitslabor in der Abteilung Durability bei der MAN Truck & Bus AG in München.

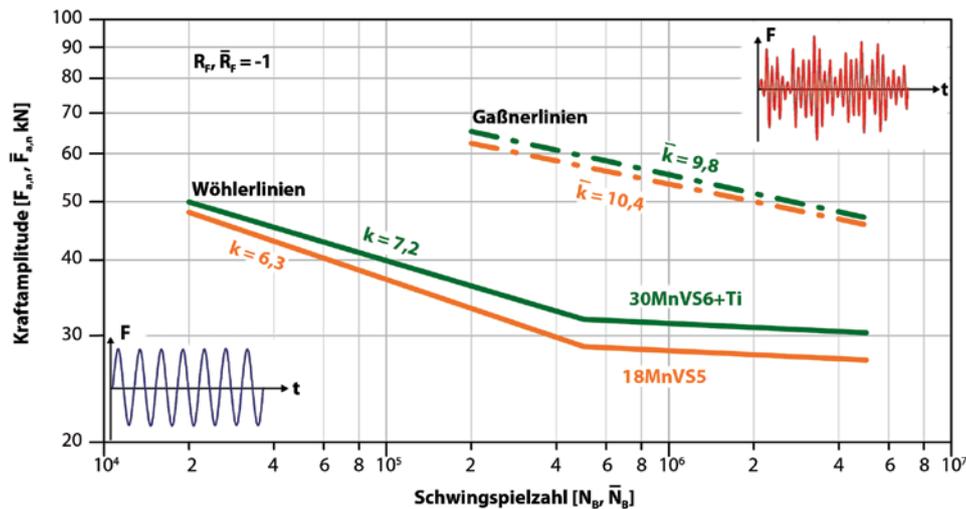


BILD 3 Wöhler- und Gaßnerversuche mit Lenkhebeln

tenheften. Weiterhin bietet die elasto-plastische Rechnung dieses Konzepts parallel die Möglichkeit, die Formdehngrenze als weiteres Bemessungskriterium zu überprüfen.

#### QUALIFIZIERUNG KOSTENGÜNSTIGER SCHMIEDEWERKSTOFFE

Ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle (AFP-Stähle) werden häufig für Bauteile verwendet, die gegenüber konstanten Amplituden bemessen werden, zum Beispiel Kurbelwellen oder Pleuel. Die Verwendung dieser Werkstoffe für Fahrwerks- und somit Sicherheitsbauteile (Achsschenkel oder Lenkhebel) muss im Bemessungsprozess wie bei den bereits etablierten Vergütungsstählen in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Hierzu müssen bauteilspezifische Bemessungskriterien erarbeitet und Unterschiede in der Schwingfestigkeit unter fahrbetriebsähnlichen Beanspruchungen (Gaßnerversuch) ermittelt werden [2]. Die Ermittlung der Schwingfestigkeiten im Gaßnerversuch ist im Sinne des Leichtbaus bei fehlenden charakteristischen Schadensummen  $D_c$  unerlässlich, da nicht unmittelbar von Kennwerten aus Einstufenversuchen auf die Lebensdauer unter variablen Amplituden geschlossen werden kann, Bild 3.

Achsschenkel unterliegen im Fahrzeug im Wesentlichen einem Biegemoment um die Fahrzeuglängsachse, das aus Vertikallasten und Seitenlasten in verschiedenen Kombinationen unter den Lastfällen Geradeausfahrt (inklusive Schlechtweganteil) und Kurvenfahrt resultiert. Die bestimmungsgemäß auftretenden Betriebslasten an Achsen von Straßenfahrzeugen sind bekannt und für die Ableitung dieser Bemessungslasten existieren standardisierte Methoden [5]. Für herkömmliche Schmiedestähle sind die Achsschenkel üblicherweise mehr als ausreichend dimensioniert, da sich der Zapfendurchmesser meist konstruktiv nach den Erfordernissen der Radlagerung, aber auch durch Steifigkeitsanforderungen wegen möglicher Sonderlasten, zum Beispiel Bremsen in einem Schlagloch, ergibt. Es wurde ferner im ersten Schritt nachgewiesen, dass diese geringere Werkstoff-

ausnutzung auch für AFP-Stähle, insbesondere unter Betriebsbelastungen, zutrifft.

Weiterhin darf bei Sonderereignissen und auch bei Missbrauch an Sicherheitsbauteilen kein Totalversagen oder Sprödbbruch auftreten, wodurch auch dem Impactverhalten eine besondere Bedeutung zukommt. Im Gegensatz zur zyklischen Belastung ist für die Impactbelastung von Achsschenkeln im Nutzfahrzeug keinerlei etablierte Annahme oder Versuchsmethode bekannt, da die bisherigen Konstruktionen historisch gewachsen sind und wegen der positiven Betriebserfahrungen mit Vergütungsstählen bisher kein expliziter Nachweis gegen Impactbeanspruchungen erforderlich war.

## Modulare 2K-Dosiersysteme



### ViscoDuo-VM

Individuelle Systemkonfiguration  
für 2K-Dosieranwendungen

- schnelle Systemreinigung
- vereinfachte Wartung
- reduzierte Ersatzteilbevorratung
- Mischeranschluss frei wählbar

ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH  
Amperstr. 13 | 84513 Töging a. Inn | Germany  
Telefon: +49 (0) 86 31 / 92 74 -0  
Internet: www.viscotec.de



Die teilweise geringere Duktilität der AFP-Stähle erfordert jedoch zumindest eine grundlegende Aussage zum Verhalten bei dieser Belastungsart. Als ungünstige, nicht bestimmungsgemäße Belastung wurde ein seitlicher Anprall des Rades gegen einen starren Bordstein mit einer seitlichen Geschwindigkeitskomponente von circa 17,5 km/h (Wegrutschen auf Glatteis) angenommen. Hierbei wird es in der Regel zu Verformungen am Fahrwerk kommen, die ohne Bruchversagen ertragen werden müssen, um das Fahrzeug kontrollierbar zum Stehen bringen zu können; die Erfassung eines solchen Ereignisses mittels Fahrzeugmessungen war in [2] nicht vorgesehen, sodass diese Vorgabe numerisch umgesetzt wurde, indem neben der Achse inklusive Rad auch der gesamte Vorderwagen modelliert wurde und die Achsschenkelbeanspruchung im Zapfenradius hieraus realitätsnah abgeleitet werden konnte, Bild 4.

Unter den gegebenen Randbedingungen Anprallgeschwindigkeit (17,5 km/h) und Achslast (4,4 t) ergab sich im Zapfenradius eine lokale Plastifizierung von rund 1 % bei einer Anprallenergie von rund 30 kJ, die weitgehend von Rad, Achsaufhängung und Rahmen aufgenommen wird. Die parallele numerische Abbildung des Achsschenkels im sehr starren Versuchsaufbau für Impactversuche ergab eine erforderliche Schlagenergie im Versuch von circa 0,5 kJ. Für eine Rissbildung waren circa 5 kJ erforderlich. Unter der Abwägung, keine übertriebenen Forderungen aufzustellen, wurde eine Schlagenergie von 2,5 kJ gewählt.

Ein Vorversuch mit Vergütungsstahl zeigte bei 2,5 kJ schon 5 mm Verformung am Zapfen, entsprechend rund 40 mm Radschiefstellung. Die Berechnung der Fahrzeugkonfiguration zeigte ebenfalls, dass starke Schäden am Rad auftreten, bevor Schäden am Achsschenkel erkennbar sind. Damit wird der Anprall auf jeden Fall als unfallartiges Ereignis erkannt.

Ein entsprechender Nfz-Achsschenkel aus AFP-Stahl ist seit Jahren erfolgreich und ohne negative Feldrückmeldungen in Serie, sodass die abgeschätzte Höhe der Schlagenergie im Versuchstand der si-



BILD 4 MKS-Modellierung des Seitenanpralls

cheren Seite zugeordnet werden kann. Es wurden Versuche an zehn Achsschenkeln mit 2,5 kJ ausgeführt, davon die Hälfte unter Polarbedingungen (-40 °C). Die Impactenergie wurde danach in Stufen bis auf 5 kJ gesteigert und von beiden AFP-Stählen auch bei -40 °C ohne erkennbare Anrisse (nach Farbeindringprüfung) ertragen, Bild 5.

Dieses Bemessungskriterium für Impact-Belastung war bisher branchenweit nicht verfügbar und wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet. Die Ergebnisse, einschließlich der abgeleiteten Schwingfestigkeitskennwerte zur Bauteilauslegung, sollen es dem Anwender ermöglichen, die AFP-Stähle als wirtschaftliche Alternative zu Vergütungsstählen mit vergleichbarer Sicherheit einsetzen zu können.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Das Bemessungskonzept für betriebsfest zu dimensionierende Schmiebauteile umfasst die Definition der Betriebslasten, die Übertragungsparameter von Kennwerten der Werkstoffprobe zur Bauteilfestigkeit und eine Absicherung der Ergebnisse im Hinblick auf die erforderliche Ausfallwahrscheinlichkeit. Die konsequente Anwendung des



BILD 5 Verformte Achsschenkel: AFP-Stahl vs. Vergütungsstahl nach Impactversuchen bei -40 °C (links: 18MnV5 BY, rechts: 38MnB5 V)

Bemessungskonzepts, der Abgleich mit Validierungsversuchen an Serienbauteilen und die Rückführung des Abgleichs in das Konzept bietet Optimierungspotenzial, auch im Hinblick auf charakteristische Schadenssummen, das final den Produkten der jeweils nächsten Generation im Sinne des Leichtbaus zugutekommt. Die Qualifizierung von AFP-Stählen für Sicherheitsbauteile ist durch eine gesonderte Betrachtung des Impactverhaltens möglich. Prinzipiell ist die genannte Vorgehensweise unter Berücksichtigung von werkstofflichen und bauteilspezifischen Besonderheiten übertragbar auf andere Werkstoffgruppen. ●

#### LITERATURHINWEISE

[1] Hanselka, H.: Leichtbaupotenzial: Keine reine Werkstofffrage Stahl und Eisen 130 (2010), Nr. 6, S. 77

[2] Betriebs sichere Auslegung von Fahrwerkssicherheitsbauteilen aus AFP-Stahl, IGF-Vorhaben 16435 BG der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) in Kooperation mit Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), gefördert über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags, Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., Hagen (2013) (die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden)

[3] Untersuchung der Versagenskriterien für Stahl und Aluminium im Hinblick auf die Bemessung von Schmiedeteilen IGF-Vorhaben 16874 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV), gefördert über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., Hagen (2013)(die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden)

[4] Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Grubišić, V.: Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten am Beispiel eines betriebsfest auszulegenden geschmiedeten Nutzfahrzeug-Achsschenkels, Konstruktion 47 (1995) Heft 7/8, S. 222-232

[5] Grubišić, V.: Methodik zur optimalen Dimensionierung schwingbeanspruchter Fahrzeugbauteile. Automobil-Industrie 28 (1983), Heft 3, S. 287-293

#### Die Autoren

DR.-ING. HEINZ KAUFMANN ist Leiter der Abteilung Werkstoffe und Bauteile im Bereich Betriebsfestigkeit am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt.

DR.-ING. MARTIN KÜPPERS ist Teamleiter Betriebsfestigkeitslabor in der Abteilung Durability bei der MAN Truck & Bus AG in München.

# Top-Innovationen aus dem Leichtbau



Thomas Zipsner (Hrsg.)

## Jahrbuch lightweightdesign - JOT - adhäsion

Top-Innovationen aus dem Leichtbau, der Oberflächen- und Klebtechnik

2013. VI, 164 S. 168 Abb. Geb.

EUR (D) 39,95 EUR (A) 41,07 EUR (\*sFr) 50,00

978-3-658-00985-4

In diesem Jahrbuch werden die Top-Innovationen aus dem Leichtbau, der Oberflächen- und Klebtechnik zu einem Band zusammengeführt. Heutzutage ist ein gesamtheitlicher Blick auf Konstruktion, Werkstoff und Fertigung unerlässlich. Die Autoren sind Fachleute aus Industrie und Forschung; sie greifen Themen z. B. der Fahrzeugindustrie oder Windkraft auf und stellen aktuelle Entwicklungen, Ergebnisse und Trends dieser Techniken dar.

### Der Inhalt

Teil A: Leichtbau

Teil B: Oberflächentechnik

Teil C: Klebtechnik

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt.  
Die mit \* gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Einfach bestellen: [SpringerDE-service@springer.com](mailto:SpringerDE-service@springer.com)  
Telefon +49 (0)6221 / 345 - 4301

 Springer Vieweg