

Material-based Service Life Estimates of Forged Components Made of Steel and Aluminium

Safety-related components in vehicle construction are often designed as forged components. Current steel and aluminium alloy concepts offer a significant strength potential, which is also to be increased under cyclic loading conditions. In order to be able to dispense with cost and time-intensive iteration loops with prototypes during the development phase, the component design and optimisation is carried out virtually. A numeric calculation

method is necessary for this, which precisely describes the material or component behaviour under cyclic loading conditions. When applying the service life estimate concepts, not only are different material and component characteristic values necessary, but simulation results also vary considerably, such that the designer needs to decide which result he should trust. Using a combination of notch elongation and nominal stress concepts, a method to estimate material-based service life is created, which satisfies current requirements and enables a reliable evaluation of cyclically-loaded safety components made from steel and aluminium.

Werkstoffbasierte Lebensdauerabschätzung von Schmiedebauteilen aus Stahl und Aluminium

B. Eng. Matthias Hell,
Dr.-Ing. Rainer Wagener und
Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz, Darmstadt

Sicherheitsrelevante Bauteile und Komponenten im Fahrzeugbau werden häufig als Schmiedebauteil ausgelegt. Dabei bieten aktuelle Stahl- und Aluminium-Legierungskonzepte ein erhebliches Festigkeitspotenzial, das auch zuverlässig unter zyklischer Belastung zu heben ist. Um auf kosten- und zeitintensive Iterationsschleifen mit Prototypen während der Entwicklungsphase verzichten zu können, gilt es, die Bauteilauslegung und -optimierung in den virtuellen Raum zu verlagern. Dazu wird eine numerische Bemessungsmethode

benötigt, die das Werkstoff- beziehungsweise Bauteilverhalten unter zyklischer Belastung präzise beschreibt. Zur Anwendung der Lebensdauerabschätzungskonzepte werden nicht nur unterschiedliche Werkstoff- und Bauteilkennwerte benötigt, auch unterscheiden sich die Simulationsergebnisse mitunter erheblich, sodass der Konstrukteur sich entscheiden muss, welchem Ergebnis er vertrauen soll. Durch eine Kombination aus Kerbdehnungs- und Nennspannungskonzept wird eine Methode zur werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung geschaffen, die den aktuellen Anforderungen gerecht wird und eine zuverlässige Bewertung von zyklisch belasteten Sicherheitsbauteilen aus Stahl und Aluminium ermöglicht.

Einleitung

Mit Blick auf eine virtuelle Produktentwicklung nimmt die Bedeutung von rechnerischen Methoden zur Abschätzung der Bauteillebensdauer zu. Neben den Geometriedaten werden Werkstoffkennwerte benötigt, die das Materialverhalten unter zyklischer Beanspruchung beschreiben, das sind das zyklische

Spannungs-Dehnungsverhalten sowie das Beanspruchungs-Lebensdauer-Verhalten.

Für die numerische Beanspruchbarkeitsanalyse von zyklisch beanspruchten Bauteilen steht eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung, die nach Radaj und Vormwald [1] in bauteil- und werkstoffbezogene Bemessungsmethoden

sowie bruchmechanische Ansätze eingeteilt werden können. Im Folgenden wird anhand des Nennspannungskonzepts beziehungsweise des daraus abgeleiteten Kerbspannungskonzepts als Vertreter der bauteilbezogenen Bemessungskonzepte und des Kerbdehnungskonzepts als Vertreter der werkstoffbezogenen Bemessungskonzepte das Vorgehen erläutert

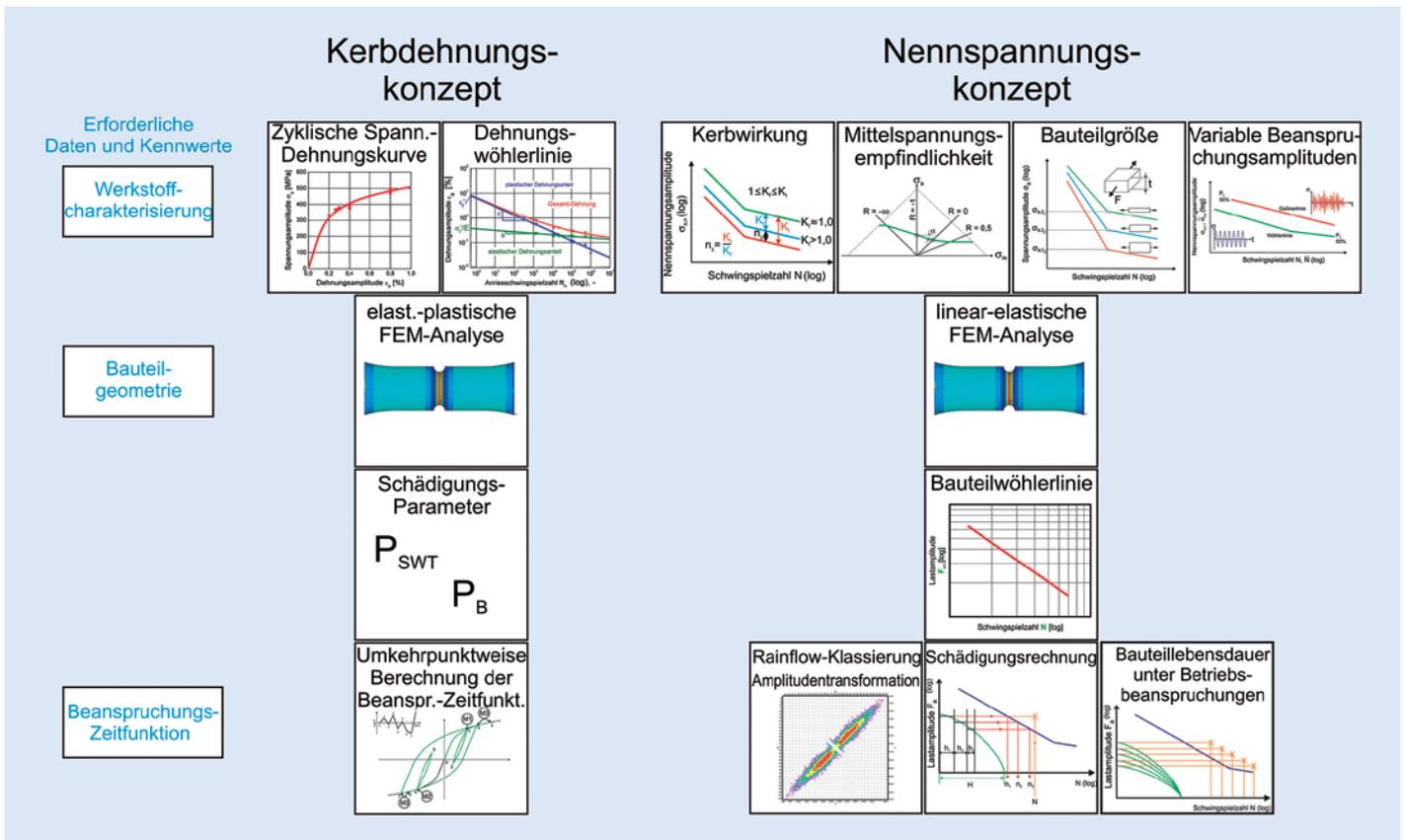


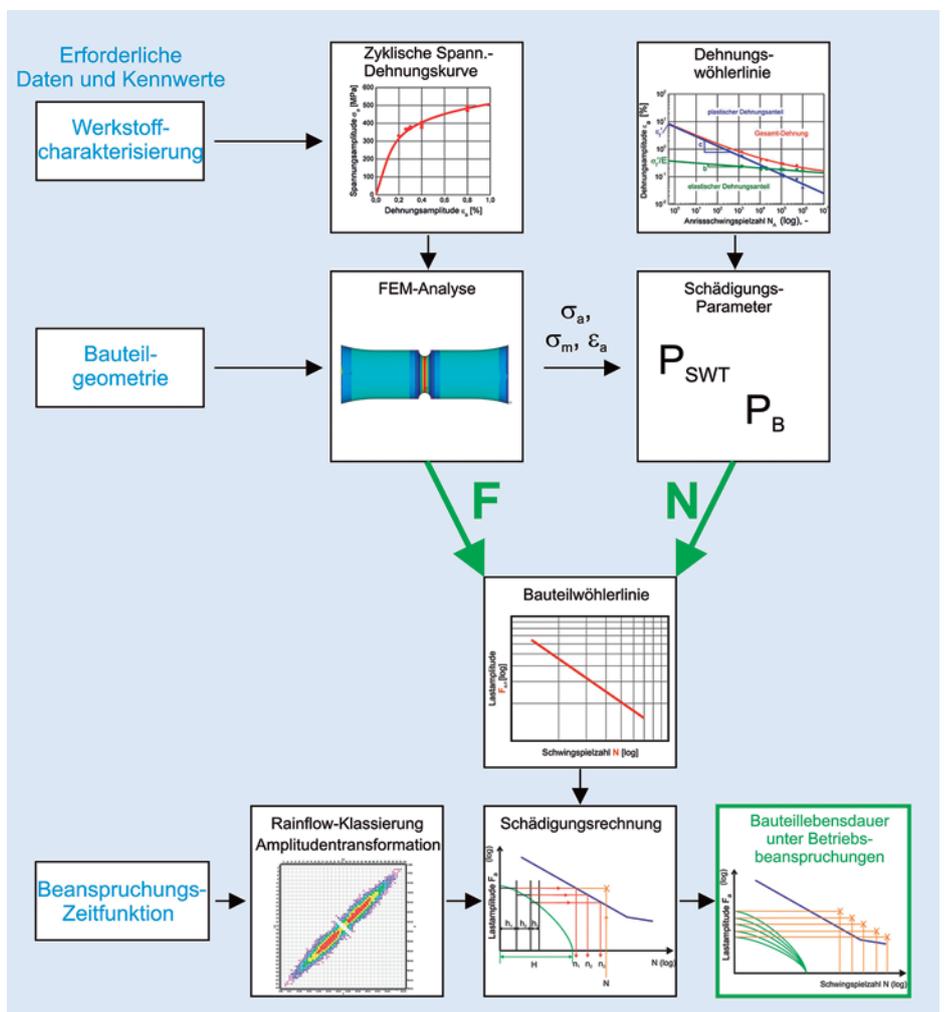
Bild 1: Bauteilbemessung mit dem Kerbdehnungs- und Nennspannungskonzept.

(Bild 1) sowie eine Methode zur werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung abgeleitet.

Nennspannungskonzept und Kerbspannungskonzept

Das Nennspannungskonzept bewertet Nennspannungsamplituden im ermüdungskritischen Bauteilquerschnitt mit den für den Einzelfall gültigen Nennspannungs-Wöhlerlinien. Dabei enthalten diese Wöhlerlinien den Einfluss von Werkstoff, Kerben und Größeneffekte sowie Oberflächenzustände. Auf die Lebensdauer unter variablen Amplituden wird durch die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [2, 3] beziehungsweise mit einer modifizierten Version [4, 5] geschlossen. Diese Modifikationen unterscheiden sich bei den gängigen Methoden nur durch den anzunehmenden Verlauf der Wöhlerlinie.

Die Herausforderung bei diesem Konzept besteht darin, eine zutreffende Wöhlerlinie für die Geometrie und das Lastverhältnis verfügbar zu haben. Dies erfordert meistens eine Vielzahl an Wöhlerlinien oder den Einsatz von Näherungslösungen. Zur Übertragung der an Werkstoffproben ermittelten Schwingfestigkeit auf unterschiedlichen Kerbkonfigurationen sowie zur Berücksichtigung des statistischen und spannungsmechanischen Größeneinflusses bietet sich die Methode des höchstbeanspruchten Volumens an, sodass der experimentelle Aufwand reduziert werden kann [6].



Der größte Vorteil des Nennspannungs-

Bild 2: Werkstoffbasierte Lebensdauerabschätzung.

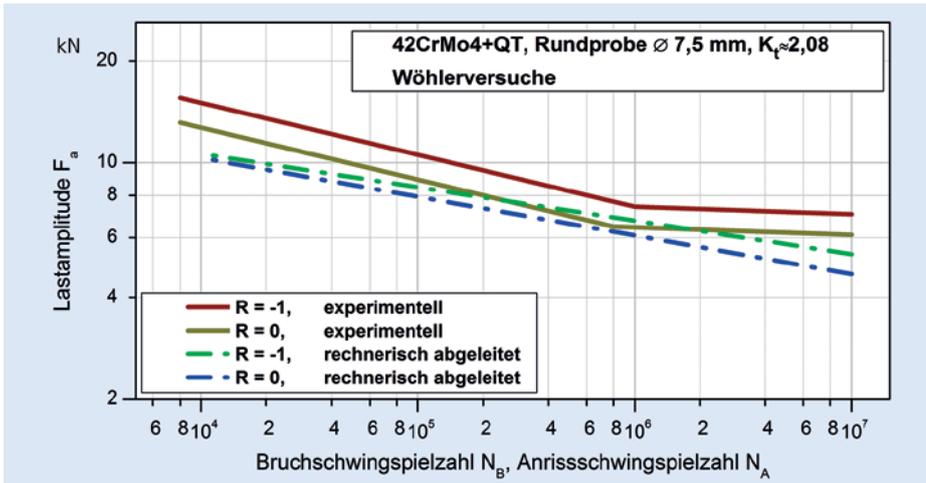


Bild 3: Vergleich der werkstoffbasierten Bauteilwöhlerlinien mit den experimentellen Wöhlerlinien.

konzepts ist, dass der Simulationsaufwand begrenzt ist, da nur linear-elastische FE-Rechnungen erforderlich sind. Der experimentelle Aufwand zur Bestimmung der benötigten Nennspannungs-Wöhlerlinien für die einzelnen Belastungen und Kerbkonfigurationen sind als Nachteil zu bewerten. Die größte Herausforderung ist jedoch häufig die Definition einer Nennspannung für die relevanten Bauteilquerschnitte. Daher wird gerne anstatt der Nennspannung eine örtliche Kerbspannung verwendet, die sich ebenfalls mit Hilfe von einer linear-elastischen FE-Rechnung bestimmen lässt und nicht die Definition einer Nennspannung erfordert. Voraussetzung für die Schadensakkumulation ist lediglich, dass die Beanspruchung und die Beanspruchbarkeit in der gleichen physikalischen Größe beschrieben werden.

Kerbdehnungskonzept

Die erforderliche Werkstoffcharakterisierung beschränkt sich auf dehnungsgeregelte Schwingfestigkeitsversuche an ungekerbten Werkstoffproben zur Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie sowie der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve. Verglichen mit

der Ermittlung einer Nennspannungswöhlerlinie ist die experimentelle Bestimmung der zyklischen Werkstoffkennwerte aufwendiger, jedoch reicht eine Versuchsreihe aus, um die benötigten Parameter zu ermitteln. Zur Berücksichtigung des Gleichcharakters, das heißt der Auswirkungen von unterschiedlichen Beanspruchungshöhen auf das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten, wird zusätzlich die Durchführung von Incremental-Step-Tests empfohlen [7, 8]. Makroskopische Stützwirkungen, die aus Beanspruchungsgradienten resultieren, können bei der Beanspruchungsermittlung mit nicht-linearen FEM-Simulationen berücksichtigt werden, was eine gute Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten auf unterschiedliche Bauteilgeometrien ermöglicht. Dem reduzierten Aufwand bei der Kennwertermittlung steht jedoch ein größerer Simulationsaufwand gegenüber, da die Schädigung der Beanspruchungszeitfunktion umkehrpunktweise mit Hilfe von elastisch-plastischen FE-Rechnungen zu erfolgen hat.

Die Verwendung von lokalen Werkstoffkennwerten zur Beschreibung des gradienten-

behafteten Werkstoffverhaltens ist ein großer Vorteil dieser Bemessungsmethode. Dies erhöht zwar den experimentellen und numerischen Aufwand, erhöht jedoch die Simulationsgüte bezüglich Versagensort und resultierender Lebensdauer deutlich [9, 10, 11].

Werkstoffbasierte Lebensdauerabschätzung

Die Grundlage einer werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung (Bild 2) bilden das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten und die Dehnungswöhlerlinie. Um eine qualitative Bewertung des Gleichcharakters [8, 12] einschließen zu können, wird die zyklische Spannungs-Dehnungskurve eines Incremental-Step-Tests verwendet, denn diese repräsentiert das Werkstoffverhalten unter variablen Beanspruchungsamplituden wesentlich besser als die Spannungs-Dehnungskurve aus den Wöhlerversuchen. Die Kennwerte der Dehnungswöhlerlinie nach Coffin-Manson-Morrow beziehungsweise der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie zur Beschreibung der Beanspruchbarkeit werden aus den Dehnungswöhlerversuchen abgeleitet.

Die Ableitung der Bauteilwöhlerlinie für ein beliebiges Lastverhältnis R als Ausgangsbasis für eine Schadensakkumulationsrechnung erfolgt durch eine Lebensdauerabschätzung für konstante Beanspruchungsamplituden mittels Schädigungsparametern, zum Beispiel nach Smith-Watson-Topper [13] und Bergmann [14], auf Grundlage nichtlinearer elastisch-plastischer FEM-Simulationen. Durch die Verformungsbedingungen werden in der FEM-Analyse makroskopische Stützeffekte einbezogen, die an höchstbeanspruchten Stellen im Bauteil durch plastischen Spannungsabbau in den umliegenden Werkstoff infolge des Spannungsgradienten hervorgerufen werden.

Wird die resultierende Lebensdauer nicht in Abhängigkeit des Schädigungsparameters, sondern von der äußeren Last, die bei der numerischen Beanspruchungssimulation verwendet worden ist, angegeben, so wird die Schädigungsparameterwöhlerlinie in eine Bauteilwöhlerlinie überführt und eine Lebensdauerabschätzung nach der Palmgren-Miner-Regel ermöglicht (Bild 3).

Durch die Verwendung der werkstoffbasierten Bauteilwöhlerlinie kann bei der anschließenden Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [2, 3] mit Modifikationen der Wöhlerlinie, zum Beispiel nach Haibach [4, 5], auf charakteristische Schadenssummen verzichtet werden.

Bei Verwendung der theoretischen Schadenssumme $D_{th} = 1$, das heißt ohne Kenntnis der charakteristischen Schadenssumme der Teilfolge, wird die Lebensdauer mit dem Nennspannungskonzept deutlich überschätzt (Bild 4). Die Abschätzung der ertragbaren

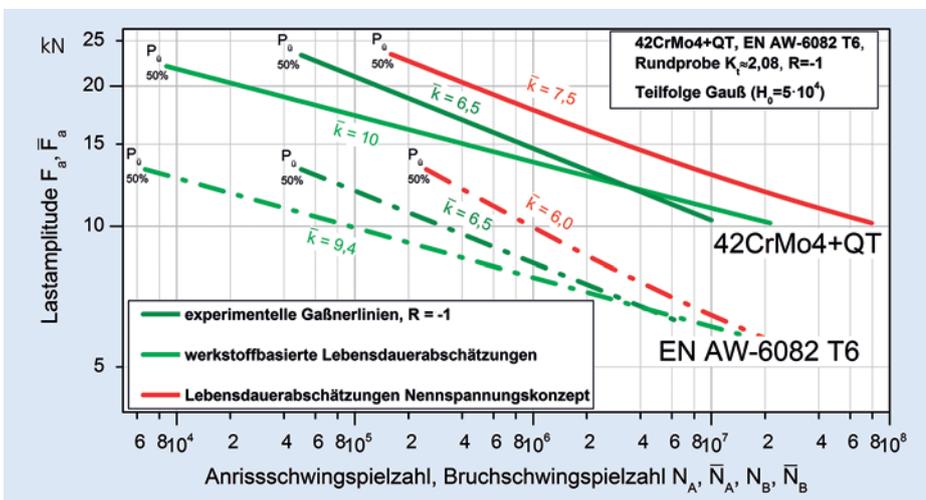


Bild 4: Vergleich zwischen werkstoffbasierter Lebensdauerabschätzung und Lebensdauerabschätzung im Nennspannungskonzept nach Palmgren-Miner mit Modifikation nach Haibach, $D_{th} = 1$. Bilder: Autoren

Fachbeiträge

Schwingspielzahlen anhand der der werkstoffbasierten Bauteilwöhlerlinie ist bei höheren Beanspruchungsamplituden hingegen konservativ. Im Bereich zwischen $N = 1,0 \cdot 10^6 \dots 4,0 \cdot 10^6$ Schwingspiele bildet diese Methode die experimentellen Ergebnisse gut ab.

Zusammenfassung

Durch die Kombination von Elementen des Nennspannungskonzepts und des Kerbdehnungskonzepts zur werkstoffbasierten Lebensdauerabschätzung wird eine Reduzierung des numerischen und experimentellen Aufwands bei der Bauteilauslegung erreicht. Die umfangreiche experimentelle Charakterisierung des Einflusses von Spannungskonzentrationen und Mittelspannungen auf die Schwingfestigkeit kann durch die Verwendung einer werkstoffbasierten Bauteilwöhlerlinie umgangen werden. Weiterhin kann auf die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner zurückgegriffen und auf charakteristische Schadenssummen verzichtet werden.

Innerhalb des Forschungsprojekts ist ein Leitfaden entstanden, dessen Anwendung in einem Workshop des Industrieverbands Massivumformung e.V. in Kooperation mit dem Fraunhofer LBF und dem Fachgebiet SzM der TU Darmstadt vorgestellt wird. ■



B. Eng. Matthias Hell



Dr.-Ing. Rainer Wagener



Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16874 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen

Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen

Bundestags gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Literatur

[1] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit, Springer-Verlag Berlin (2007), 3. Auflage.

[2] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern, VDI-Z 58 (1924), S. 339-341.

[3] Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics (1945) 12, pp. 159-164.

[4] Haibach, E.: Modifizierte lineare Schadensakkumulationshypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung, LBF Technische Mitteilung TM 50, 1970.

[5] Liu, J.; Zenner, H.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept, Konstruktion 44, 1992.

[6] 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.

[7] Landgraf, R. W.; Morrow, J.; Endo, T.: Determination of the cyclic stress-strain curve, Journal of Materials, JMLSA. (1969), No. 4, pp. 176-188.

[8] Wagener, R.: Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, Papierfliegerverlag, 2007.

[9] Tomasella, A.; Bauer, O.; Landersheim, V.; Eufinger, J.; Kaufmann, H.; Hanselka, H.: An experimental and numerical fatigue assessment of ultrafine-grained microstructures produced by severe plastic deformation under constant and variable amplitude loading, Proceedings LCF7, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e. V. (Hrsg.), Berlin, 2014.

[10] Wagener, R.; Schatz, M.: Leichtbau mit Hilfe von zyklischen Werkstoffkennwerten für Strukturen aus Feinblech, FAT-Schriftenreihe Nr. 191, Frankfurt a. M., 2005.

[11] Wagener, R.; Nikkel, K.; Masendorf, R.; Esderts, A.; Buschermöhle, H.; Woltering, F.: Leichtbau mit Hilfe von zyklischen Werkstoffkennwerten für Strukturen aus Feinblech im PKW-Bau, Proceedings und DVM-Bericht 131 „Leichtbau und Betriebsfestigkeit“, S. 47-58, München, 2004.

[12] Christ, H.-J.: Materialermüdung und Werkstoffmikrostruktur, Ermüdungsverhalten Metallischer Werkstoffe, Hrsg. H.-J. Christ, Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, 1998.

[13] Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: A stress-strain function for the fatigue of metals, Journal of Materials 5 (1970), Nr. 4, pp. 767-778.

[14] Bergmann, J. W.: Zur Betriebsfestigkeitsbemessung gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchungen, Dissertation TH Darmstadt, Veröffentlichungen des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt, 1983.