

## The Influence of the Course of the Grain on the Fatigue Resistance of AFP Steels

Thanks to their exposure to heat in the forming, AFP steels enable an economical manufacturing process. They gain an additional competitive edge when the influence of the course of the grain on the vibration resistance can be used to advantage. This was the motivation for the recently completed research project „The Course of the Grain in AFP Steels“.

Dipl.-Ing. Nora Exel,  
Dr.-Ing. Heinz Kaufmann  
und Dipl.-Ing. Markus Türk,  
Darmstadt

# Einfluss des Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit von AFP-Stählen

AFP-Stähle ermöglichen aufgrund ihrer Wärmebehandlung aus der Umformwärme einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess. Sie gewinnen einen zusätzlichen Wettbewerbsvorteil, wenn der Einfluss ihres Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit zuverlässig bewertet werden kann. Dies war die Motivation für das vor kurzem abgeschlossene Forschungsprojekt „Faserverlauf in AFP-Stählen“.

### Ausgangssituation

Während der Umformung orientieren sich die im AFP-Stahl enthaltenen nichtmetallischen Einschlüsse entsprechend dem Materialfluss. Die dabei entstehende zeitliche Anordnung der Einschlüsse wird als Faserverlauf bezeichnet. Insbesondere Mangansulfide sind gegenüber der Stahlmatrix gut verformbar und richten sich entsprechend stark aus [1, 2]. Die bei Stählen zu beobachtende Richtungsabhängigkeit der Schwingfestigkeit wird im Wesentlichen auf die Orientierung der Mangansulfide zurückgeführt [2].

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts der Einfluss der Faserrichtung und des Fasergehalts – in Form der Richtung und Menge der Mangansulfide – auf die Schwingfestigkeit untersucht. Um quantitative Zusammenhänge zwischen Faserverlauf und Schwingfestigkeit bereits in die



Bild 1: Faserverlauf eines warm massivumgeformten Bauteils – HCl-Ätzung.

Quelle: Hirschvogel Umformtechnik GmbH

rechnerische Auslegung oder auch Bemessung von Bauteilen einfließen lassen zu können, wurde parallel untersucht, wie der Faserverlauf numerisch abgebildet werden kann.

### Werkstoffe und Versuche

Für das Vorhaben wurde der weit verbreitete AFP-Stahl 38MnVS6 ausgewählt und mit den am Markt konkurrierenden Vergütungsstählen 30MnB5 und 33MnCrB5-2 verglichen. Für die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Faserrichtung auf die Schwingfestigkeit wurden aus Walzmaterial Proben quer ( $\varphi=90^\circ$ ) und längs ( $\varphi=0^\circ$ ) zur Walz- beziehungsweise Faserrichtung für alle drei Werkstoffe entnommen. Der Fasergehalt wurde über den Schwefelgehalt des AFP- und Vergütungsstahls variiert. Die Schwefelgehalte der AFP-Chargen lagen bei 0,029 Prozent und 0,063 Prozent, der des Vergütungsstahls 30MnB5 bei 0,008 Prozent und der des 33MnCrB5-2 bei 0,025

Prozent. Die Streckgrenze der Vergütungsstähle entsprach der des AFP-Stahls mit 0,029 Prozent Schwefel. Mit allen Werkstoffen wurden dehnungsregelte Wöhlerversuche unter Wechsellast  $R_{\epsilon} = -1$  an ungekerbten Proben durchgeführt. Für den AFP-Stahl erfolgten zusätzlich kraftgeregelte Versuche mit Schwellbelastung  $R_{\delta} = 0$  und Versuche mit gekerbten Proben bei  $R_{\delta} = -1$ .

**Einfluss Faserrichtung**

Für alle untersuchten Werkstoffe mit Ausnahme des 30MnB5 lag die Schwingfestigkeit bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung niedriger als bei Beanspruchung längs zur Faserrichtung. Das Verhältnis zwischen Quer- und Längsbeanspruchbarkeit wird im Folgenden mit relativer Anisotropie

$$A = \frac{\sigma_{a,k,\varphi = 90^\circ}}{\sigma_{a,k,\varphi = 0^\circ}}$$

bezeichnet. Tabelle 1 enthält die ermittelten Anisotropie-Werte der ungekerbten Versuchsreihen. Sie wurden am Abknickpunkt  $N_k$  der abgeleiteten Spannungswöhlerlinien unter Wechselbeanspruchung  $R_{\epsilon} = -1$  ermittelt.

Die erzielten Ergebnisse und Untersuchungen aus [3–11] zeigen, dass die Richtungsabhängigkeit der Schwingfestigkeit mit steigendem

Werkstoff	Schwefelgehalt	Anisotropie A
38MnVS6	0,029 Prozent	0,90
38MnVS6 <sup>1)</sup>	0,029 Prozent	0,87
38MnVS6	0,063 Prozent	0,94
30MnB5	0,008 Prozent	1,00
33MnCrB5-2	0,025 Prozent	0,92

Tabelle 1: Relative Anisotropie A. <sup>1)</sup> Entnahme der Proben aus dem Kern des Walzmaterials – alle übrigen Versuchsreihen mit Proben aus Randlage.

Quelle: Autoren

Schwefel- beziehungsweise Fasergehalt und steigender Zugfestigkeit zunimmt. Die dominierende Größe ist die Zugfestigkeit; der Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Anisotropie ist in Bild 2 dargestellt. Einen ersten Hinweis auf die zu erwartende Anisotropie der Schwingfestigkeit kann auch die Anisotropie der im Zugversuch ermittelten Duktilitätskennwerte  $A_5$  und  $Z$  geben. Bild 3 zeigt am Beispiel der Bruchdehnung  $A_5$ , dass die Richtungsabhängigkeit der Schwingfestigkeit mit der Richtungsabhängigkeit der Bruchdehnung und Brucheinschnürung zunimmt. Die Richtungsabhängigkeit der Duktilitätskennwerte ist jedoch ausgeprägter als die der Schwingfestigkeit.

Bei bauteilrelevanten Kerben mit  $K_t = 2$  veränderte sich die Richtungsabhängigkeit der Schwingfestigkeit nicht. Ergänzende Versuche

mit Fasern unter 45° zur Belastungsrichtung legen einen linearen Zusammenhang zwischen Faserrichtung und Schwingfestigkeit nahe. Im Gegensatz zur Schwingfestigkeit waren das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten – wie auch die statische Streckgrenze und Zugfestigkeit – von der Faserrichtung unabhängig.

**Einfluss Fasergehalt**

Der Fasergehalt wurde gemäß ASTM E 1245-3 über den Flächenanteil  $A_A$  der Mangansulfide im faserparallelen Schliiff und die Anzahl der Mangansulfide pro  $mm^2$   $N_A$  quantifiziert. Die Kenngrößen  $A_A$ ,  $N_A$  und damit der Fasergehalt korrelieren positiv-linear mit dem Schwefelgehalt der untersuchten Werkstoffe.

Neben den unterschiedlichen Schwefel- beziehungsweise Fasergehalten wiesen die untersuchten AFP-Chargen Gefügeunterschiede in Korngröße und Ferritgehalt auf. Diese Unterschiede wirkten sich auf die Härte des Werk-

den Proben, welche quer zur Faserrichtung beansprucht wurden, und jenen Proben, die längs zur Faserrichtung belastet wurden. Bei Belastung in Faserlängsrichtung lagen am Bruchausgang entweder einzelne oxidische Einschlüsse vor oder es konnten keinerlei Einschlüsse detektiert werden. Auf den Bruchflächen der quer zur Faserrichtung belasteten Proben wurden hingegen Anhäufungen von Mangansulfiden (MnS), MnS-Calcium-Magnesium-Aluminate und in seltenen Fällen Oxid-Ansammlungen am Bruchausgang beobachtet. Die Analyse der Bruchflächen bestätigte somit, dass die Anisotropie der Schwingfestigkeit auf den Einfluss der Mangansulfide bei Querbelastung zurückzuführen ist.

**Übertragbarkeit auf reale Gefüge und Belastungsbedingungen**

Die Möglichkeit zur Übertragung der am Walzmaterial abgeleiteten quantitativen Zusammenhänge aus Bild 4 auf reale Gefüge

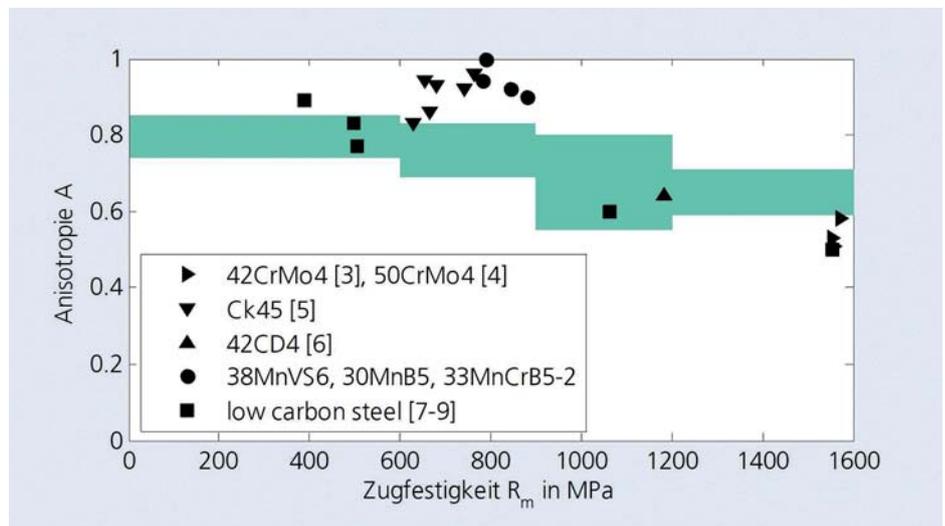


Bild 2: Einfluss der Zugfestigkeit auf die Anisotropie A der Schwingfestigkeit. Die eingetragene Fläche ist der Bereich zwischen minimalem und mittlerem Anisotropiekoeffizient nach FORREST [10, 11].

Quelle: Autoren

stoffs und somit auch auf dessen Schwingfestigkeit aus. Um dem Einfluss des Gefüges und des Schwefel- beziehungsweise Fasergehalts voneinander zu trennen, wurde in Bild 4 die Schwingfestigkeit  $\sigma_{a,k,\varphi = 0^\circ}$  über die Härte und den Schwefelgehalt aufgetragen. Für den AFP-Stahl und den Vergütungsstahl nimmt die Schwingfestigkeit jeweils mit zunehmendem Schwefel- beziehungsweise Fasergehalt und abnehmender Härte ab. Dabei tendiert der Vergütungsstahl bei vergleichbarem Schwefelgehalt und Härte zu etwas geringeren Schwingfestigkeiten.

**Bruchflächenanalyse**

Die Bruchflächen des 38MnVS6 und des 33MnCrB5-2 wurden auszugsweise im Raster-Elektronen-Mikroskop hinsichtlich bruchauslösender Einschlüsse betrachtet. Hierbei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen

wurde an Proben aus Unimog-Achsschenkeln überprüft. Die Schwingfestigkeit der aus Achsschenkeln entnommenen Proben konnte auf Basis des Walzmaterials nur mit relativ großen Abweichungen von 14 bis 20 Prozent abgeschätzt werden. Ursache hierfür waren vermutlich die sehr deutlichen Gefügeunterschiede zwischen dem untersuchten Walzmaterial und den ausgewählten Bereichen der Achsschenkel. Da Bauteile im realen Betrieb Belastungen mit variablen Amplituden ausgesetzt sind, wurden im Rahmen des Vorhabens zusätzlich Gaßnersversuche durchgeführt. Hierfür wurde eine für einen Nutzfahrzeug-Achsschenkel abgeleitete Lastfolge verwendet. Im konkreten Fall bildeten sich die unter konstanten Amplituden festgestellten Unterschiede in der Beanspruchbarkeit bei Längs- und Querbelastung in vergleichbarer Größe auch unter variablen Amplituden ab.

**Simulation des Faserverlaufs**

Zur rechnerischen Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung des Fasergehalts sowie der Faserrichtung wurde eine Methode entwickelt, die den realen Faserverlauf in einer kommerziellen FE-Software abbildet. Hiermit ist es möglich, eine Abschätzung der

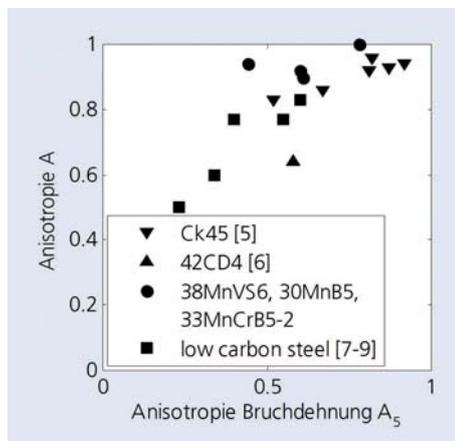


Bild 3: Zusammenhang zwischen der Anisotropie A der Schwingfestigkeit und der Anisotropie des im Zugversuch ermittelten Duktilitätskennwerts  $A_5$ .  
Quelle: Autoren

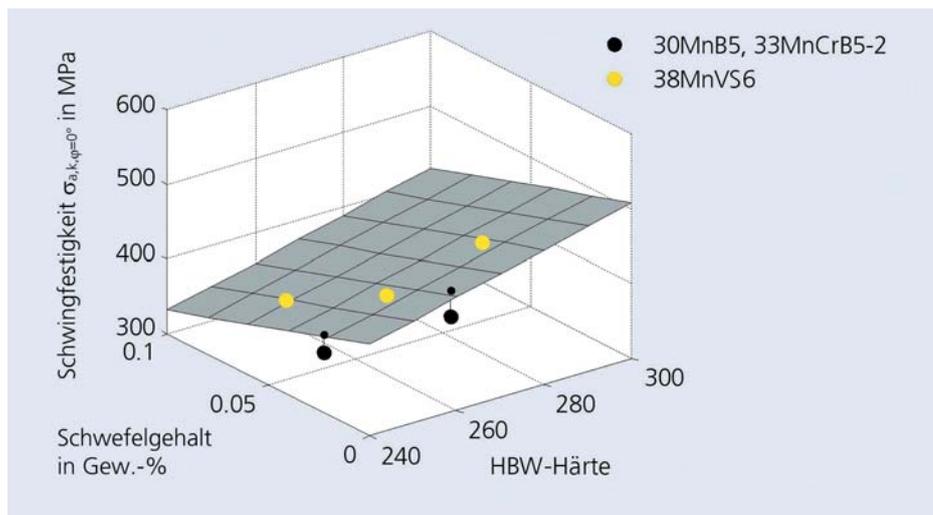


Bild 4: Zusammenhang zwischen HBW-Härte, Schwefelgehalt und faserparalleler Schwingfestigkeit  $\sigma_{a,k,q=0}$  am Abknickpunkt  $N_k=2 \cdot 10^6$  der abgeleiteten Spannungswöhlerlinien mit  $R_c=-1, P_{0,50} \%$ .  
Quelle: Autoren

Faserorientierung sowie des Fasergehalts im späteren Bauteil zu treffen. Durch eine Überlagerung dieser gewonnenen Erkenntnisse mit einer numerischen Belastungssimulation des Bauteils kann der lokale Einfluss der Fasern auf die Schwingfestigkeit ermittelt und dargestellt

werden. Für eine Umsetzung in der Praxis sind in Zukunft Fragestellungen hinsichtlich der Mehrachsigkeit und des Abgleichs zwischen simuliertem und realem Fasergehalt zu beantworten.

**Zusammenfassung**

Mit dem durchgeführten Projekt wurden Erkenntnisse zum Einfluss des Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit gewonnen, die in der Praxis für eine zuverlässigere und werkstoffgerechtere Bewertung von Bauteilen aus AFP-Stahl genutzt werden können. Insbesondere durch den Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur kann auf Grundlage der Untersuchung auch für andere Schmiedestähle die Richtungsabhängigkeit der Schwingfestigkeit auf Basis der Zugfestigkeit, des Schwefelgehalts sowie gegebenenfalls der Richtungsabhängigkeit der Duktilitätskennwerte  $A_5$  und  $Z$  abgeschätzt werden.

Die vergleichenden Versuche an den Vergütungsstählen 30MnB5 und 33MnCrB5-2 haben gezeigt, dass AFP-Stähle bei zyklischer Beanspruchung gegenüber den teureren Vergütungsstählen wettbewerbsfähig sind.



Dipl.-Ing. Nora Exel



Dr.-Ing. Heinz Kaufmann



Dipl.-Ing. Markus Türk

Die ermittelten Zusammenhänge zwischen Faserverlauf und Schwingfestigkeit sind zusammen mit der Simulation des Faserverlaufs ein erster Schritt, diesen Einfluss in der virtuellen Bauteiloptimierung zu berücksichtigen. Die Projektergebnisse haben jedoch gezeigt, dass neben den Mangansulfiden weitere Gefügemerkmale virtuell abzubilden sind, wenn die Auswirkung lokaler Werkstoffeigenschaften hinreichend genau bei der betriebsfesten Auslegung von Bauteilen berücksichtigt werden soll. ■

**Danksagung**

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Untersuchungen durch die gemeinnützige Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. über den Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung e. V. WSM und die umfassende Unterstützung durch den projektbegleitenden Ausschuss des Industrieverbandes Massivumformung e. V.

**Literatur**

[1] Leslie, W. C.: Inclusions and Mechanical Properties. In: ISS Transactions 2 (1983), S. 1-24  
 [2] Temmel, C.: Fatigue Anisotropy in Forged Components. Göteborg, Chalmers University of Technology, Department of Materials and Manufacturing Technology, Diss., 2007. – ISSN 0346-718X  
 [3] Temmel, C.; Karlsson, B.; Ingesten, N.-G.: Fatigue Anisotropy in Cross Rolled, Hardened Medium Carbon Steel resulting from MnS Inclusion. In: Metallurgical and Materials Transactions A 37A (2006), S. 2995-3007  
 [4] Temmel, C.; Karlsson, B.; Ingesten, N.-G.: Fatigue Anisotropy in Cross Rolled, Hardened Isotropic-Quality steel. In: Metallurgical and Materials Transactions A 39A (2008), S. 1132-1143  
 [5] Doege, E.: Einfluss des Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit und die mechanischen Eigenschaften eines unlegierten Vergütungsstahls in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt, Umformgrad und der Umformtemperatur. Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 1987 – DFG-Forschungsvorhaben Do 190/49, Schlussbericht  
 [6] Caillet, Nicolas: Prise en compte des spécificités des pièces forgées en fatigue illimitée. Paris, École des Mines de Paris, Ecole Doctorale: Sciences fondamentales et appliquées, Diss., 2007  
 [7] Kage, M.; Nisitani, H.: Anisotropy of the Fatigue Limit and of the Crack Propagation Property of a Rolled Steel Plate. In: Bull JSME 18 (1975), Nr. 126, S. 1385-1394  
 [8] Kage, M.; Nisitani, H.: Anisotropy of Low-Cycle Torsional and Push-Pull Fatigue in a Rolled Steel. In: Bull JSME 20 (1977), Nr. 149, S. 1353-1358  
 [9] Kage, M.; Nisitani, H.: Effect of heat treatment on anisotropy of fatigue strength of a Rolled steel. In: Bull JSME 23 (1980), Nr. 180, S. 799-806  
 [10] Buch, Alfred: Die Verbindung zwischen Stahlreinheit, den Querkzugkennwerten und der Anisotropie der Dauerfestigkeit. In: Materialprüfung 7 (1965), Nr. 1, S. 1-5  
 [11] Forrest, P. G.: Fatigue of Metals. London: Pergamon Press, 1962