

©BMW Group

## Entwicklung von Kugelbolzen für die Vorderachse von Fahrzeugen mit modernen Antriebskonzepten

Aufgrund der zunehmenden Achsbelastung von Hybridfahrzeugen werden höhere Anforderungen an bestimmte Chassis-Komponenten wie die Kugelbolzen gestellt. Der begrenzte Platz im Fahrgestell hat zur Folge, dass die Maße dieser Komponente nicht vergrößert werden. Daher sind Werkstoffe mit höherer dynamischer Belastbarkeit notwendig. In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines kostengünstigen Kugelbolzens mit verbesserten Bauteileigenschaften dargestellt.

AUTOREN



**Dr.-Ing. Serosh Engineer**

ist Gesellschafter der EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH in Wetter (Ruhr) und ist zurzeit als technischer Berater tätig



**Thorbjørn Høiland, M.Sc.**

ist Advanced Development Manager of Technology bei der Raufoss Technology AS in Raufoss, Norwegen

**MOTIVATION**

Komponenten wie Kugelbolzen werden derzeit aus dem Stahl 42CrMo4 hergestellt. Sie werden kaltfließgepresst, auf eine Festigkeit von 1.050 bis 1.200 MPa vergütet, zerspannt und anschließend induktiv gehärtet, um hohe Druckeigenspannungen an der Oberfläche zu erreichen. Nachteil ist, dass die Belastbarkeit der induktiv gehärteten Kugelbolzen durch die derzeit vorhandenen Rechenmodelle nicht simuliert werden kann. In dieser Arbeit wird die Entwicklung von preiswerteren Kugelbolzen aus einem neuen Stahl 20MnCrMo7 dargestellt, der verbesserte Eigenschaften ohne Induktivhärten aufweist. Die experimentellen Ergebnisse können rechnerisch dargestellt werden und ermöglichen eine Voraussage über die Belastbarkeit des Kugelbolzens. Ein Kugelbolzen verbindet die Zugstrebe und den Querlenker mit dem Schwenklager (Bild 1).

**MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN**

Für die Neuentwicklung wurde ein Stahl mit hoher Festigkeit (zirka 1.500 MPa) und guter Duktilität gesucht. Die ersten Vorversuche an 20MnCrMo7 (Werkstoff-Nr. 1.7911) zeigten, dass die geforderten Festigkeitskennwerte nach einer Vergütungsbehandlung eingestellt werden können. Tabelle 1 gibt die eingestellten Kennwerte von 20MnCrMo7 an und vergleicht sie mit den Werten des zurzeit verwendeten 42CrMo4. Der Stahl 20MnCrMo7 zeigt in diesem Zustand ein feinkörniges, martensitisches Vergütungsgefüge.

**PRÜFUNGEN AM KUGELBOLZEN**

Die Kugelbolzen wurden mittels Kaltfließpressen aus gezogenen Drahtabschnitten aus 20MnCrMo7 bei der Räuchle GmbH in Dietenheim hergestellt und vergütet. Die fertig bearbeiteten Kugelbolzen wurden einer Biege- und Lebensdauerprüfung unterzogen und die Ergebnisse mit Kugelbolzen 42CrMo4 (vergütet und induktiv gehärtet = IH) verglichen.

In Bild 2 sind das Prinzip der Prüfung sowie das Prüfgerät für die Biege- und Lebensdauerprüfung dargestellt.

Stahl	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [%]	Brucheinschnürung Z [%]
20MnCrMo7	~1.220	~1.500	~11	~55
42CrMo4	~1.080	~1.160	~12	~55

Tabelle 1: Vergleich der mechanischen Eigenschaften

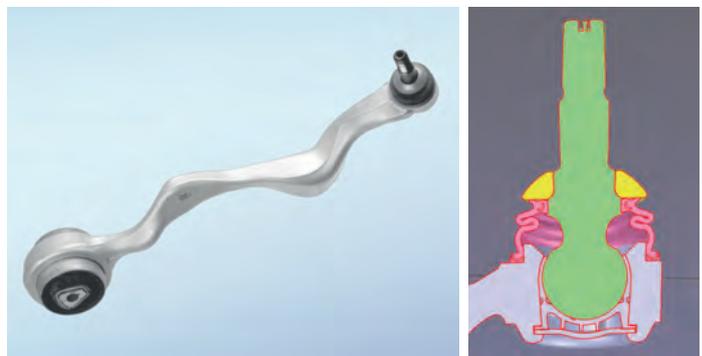


Bild 1: Kugelbolzen in der Zugstrebe (links) und Einbau (schematische Darstellung, rechts)

**BIEGEPRÜFUNG DES KUGELBOLZENS**

Der Schaft des Kugelbolzens wird eingespannt und dessen Kopf mit einer vorgegebenen Kraft gebogen (Bild 2, mittig). Die Prüfung erfolgt im elastischen und plastischen Bereich. Im elastischen Bereich bei 60 kN mit einer bleibenden Verformung von kleiner als 0,5 mm beim Entlasten des Kugelbolzenkopfs und im plastischen Bereich bei größer 70 kN ohne sichtbare Risse. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Im elastischen Bereich (60 kN) ist das Verhalten beider Kugelbolzen vergleichbar, während im plastischen Bereich der Kugelbolzen aus 20MnCrMo7 deutlich überlegen ist. Der Kugelbolzen aus 42CrMo4 zeigte erste Anrisse nach einer Biegekraft von 78 kN, während am Bolzen aus 20MnCrMo7 erst bei einer Kraft von 102 kN Risse sichtbar wurden. Die bleibende Verformung des Bolzens aus 20MnCrMo7 von 13,1 mm verdeutlicht zudem die höhere Duktilität und somit die größere Sicherheitstoleranz unter missbräuchlichen Bedingungen (wie zum Beispiel beim Fahren auf eine Bordsteinkante) gegenüber dem Kugelbolzen aus 42CrMo4.

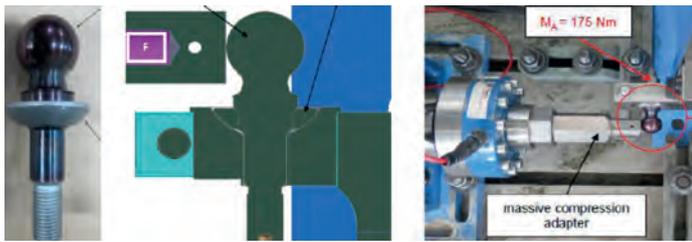


Bild 2: Kugelbolzen (links), Anordnung der Prüfung (mittig) sowie Prüfgerät für die Biege- und Lebensdauerprüfung (rechts) Bilder: Autoren

## LEBENSDAUERPRÜFUNGEN

Bei dieser Prüfung wurden zwei Prüfzyklen gefahren:

A) Anfängliche Belastung von 55 kN für einen Lastwechsel mit anschließender Prüfung im Zug-Druck-Bereich bei einer mittleren Belastung von 5 kN und einer Wechselbeanspruchung von  $\pm 18$  kN ( $R = -0,6$ ). Die Mindestanforderung für diese Untersuchung liegt bei mehr als 300.000 Lastwechseln.

B) Anfängliche Belastung von 65 kN für einen Lastwechsel mit anschließender Prüfung wie unter Prüfzyklus A.

Die anfängliche Belastung von 55 kN beziehungsweise 65 kN soll die Beanspruchung bei einer missbräuchlichen Fahrweise simulieren.

Beim Prüfzyklus A (Tabelle 3) fallen die Kugelbolzen aus 42CrMo4 unter 300.000 Lastwechsel aus, während die Kugelbolzen aus 20MnCrMo7 immer Lastwechsel von mehr als 300.000 aufzeigen.

Der Prüfzyklus B wurde daher nur an Kugelbolzen aus dem Stahl 20MnCrMo7 vorgenommen. Auch bei dieser höheren anfänglichen Beanspruchung wurden Lastwechsel von mehr als 300.000 erreicht. Somit zeigen sie ein überlegeneres Lebensdauerverhalten als die Kugelbolzen aus 42CrMo4 im vergüteten und induktiv gehärteten Zustand. Wird die IH-Randschicht beschädigt, bauen sich die Druckeigenstressungen ab und das Lebensdauerverhalten der Kugelbolzen wird beeinträchtigt.

Kugelbolzenstahl/Prüfzustand	Kraft	Bleibende Verformung nach dem Entlasten im elastischen Bereich	Bleibende Verformung nach dem Entlasten im plastischen Bereich
20MnCrMo7, vergütet auf $R_m = 1.500$ MPa	60 kN (im elastischen Bereich)	0 mm	
42CrMo4, vergütet auf $R_m = 1.160$ MPa + IH		0 mm	
20MnCrMo7, vergütet auf $R_m = 1.500$ MPa	102 kN (im plastischen Bereich)		13,1 mm
42CrMo4, vergütet auf $R_m = 1.160$ MPa + IH	78 kN (im plastischen Bereich)		3,4 mm

Tabelle 2: Ergebnisse der Biegeprüfung an Kugelbolzen aus 20MnCrMo7 und 42CrMo4

Diese Verhaltensweise wird durch die FE-Berechnung zur Voraussage der Lebensdauer von Kugelbolzen nach der IH-Behandlung offenbart.

## VORAUSSAGE DER LEBENSDAUER VON KUGELBOLZEN MITTELS MEHRACHSIGER BERECHNUNGSFORMEL

Ein zuverlässiges Rechenmodell für die Vorhersage der Lebensdauer von Kugelbolzen ist von Bedeutung, um bei verschiedenen Kugelbolzengeometrien für die unterschiedlichen Fahrzeugmodelle kostspielige Lebensdauererprobungen einsparen zu können. Hier wird nur kurz die Vorgehensweise für die Berechnungsgrundlage skizziert. Sie ist in einer anderen Veröffentlichung ausführlich beschrieben [1].

Eine mehrachsige, zyklische, plastische Verformung muss in Betracht gezogen werden, um den Schaden durch missbräuchliche Ereignisse zu erfassen. Es gibt im Prinzip zwei Modelle, um die zyklischen Leistungen zu berechnen:

- Spannungsmodell mittels S/N-Kennlinien und
- Dehnungsmodell mittels  $\epsilon/N$ -Kennlinien

Das dehnungsbasierte Modell kann die plastische Verformung an der Risspitze, die zur Risseinleitung führt, recht genau berechnen [3]. Der Rissfortschritt kann durch Zug- und/oder Schubspannung beeinflusst werden, wie von Paris postuliert [2]. Dieser Ansatz wird genommen, um eine duktile Komponente für die Radaufhängung zu dimensionieren.

Nach Brown und Miller ist es erforderlich, sowohl die zyklischen Schubspannungen als auch die Normaldehnung auf der Ebene der maximalen Schubspannung zur Kennzeichnung der Rissentstehung und des Rissfortschritts zu berücksichtigen. Das dehnungsbasierte Modell zur Vorhersage der Lebensdauer von Kugelbolzen wird bevorzugt, da es sowohl den Beitrag der elastischen als auch den der plastischen Dehnung zur Steuerung des lokalen Fließvorgangs in Betracht zieht.

Die Berechnung der Lebensdauer von induktiv gehärteten Kugelbolzen ist deshalb problematisch, da die induktivgehärtete Randschicht beschädigt werden kann, sobald die plastische Verformung eintritt und somit zu Schwankungen in der Lebensdauer führt.

Prüfzyklus	Lastwechselzahl von Kugelbolzen aus 20MnCrMo7, vergütet auf 1.500 MPa (R <sub>m</sub> );	Lastwechselzahl von Kugelbolzen aus 42CrMo4, vergütet auf 1.160 MPa (R <sub>m</sub> ) + IH
A; Versuch 1	> 500.000	> 235.867
A; Versuch 2	439.511	> 137.917
A; Versuch 3	> 500.000	> 500.000
B; Versuch 1	> 500.000	Kein Versuch gefahren
B; Versuch 2	530.000	Kein Versuch gefahren
B; Versuch 3	478.000	Kein Versuch gefahren

Tabelle 3: Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen im Zug-Druck-Bereich

Basierend auf den Daten in der Gleichung von Brown und Miller wurde als Benchmark die Berechnungsgrundlage für die Kugelbolzen aus 20MnCrMo7 mit einer Festigkeit von 1.500 MPa, die zu einer Lebensdauer von 200.000 Lastwechseln geführt hat, gewählt [3, 4, 5]. Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die IH-behandelten Kugelbolzen aus 42CrMo4 nach der Vergütung (zirka 1.050 MPa) und der IH-Behandlung schwankende Lebensdauern von 30.000 bis 300.000 Lastwechseln. Diese Schwankungen erschweren die Vorhersage der IH-behandelten Kugelbolzen. Sie bestätigen, dass beim Auftreten von plastischen Verformungen an der Oberfläche die IH-Randschicht verletzt wird und zu entsprechenden Abweichungen in der Lebensdauer führen kann (Tabelle 3).

**BETRACHTUNGEN ZUM SPANNUNGSRISSKORROSIONSVORHALTEN VON KUGELBOLZEN**

Bei der Verwendung von Bauteilen mit einer hohen Festigkeit wird in der Automobilindustrie die Frage des Spannungsrissskorrosionsverhaltens infolge von Wasserstoffversprödung gestellt. Das Spannungsrissskorrosionsverhalten wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise die Stahlzusammensetzung, die Verarbeitungsbedingungen, die Wärmebehandlungen, die Duktilität des Bauteils, die Vorspannung des Bauteils sowie das Diffusions- und Effusionspotenzial von Wasserstoff in das Bauteil während der Beanspruchung im Fahrbetrieb.

Während der gesamten Weiterverarbeitung zum Kugelbolzen baut sich der Wasserstoff infolge unterschiedlicher Wärmeprozesse wie das Warmwalzen, Glühen und Vergüten vollständig ab. Zudem ist der beanspruchte Bereich des Kugelbolzens vollständig umhüllt in der Zugstrebe/im Querlenker, sodass das Eindiffundieren von Wasserstoff deutlich reduziert wird. Der Schaftbereich der Kugelbolzen, der kaum beansprucht wird, ist nicht umhüllt (Bild 1). Dieser Bereich wird durch Eintauchen in ein Bad mit Zink- und Aluminium-Flocken bei 300 °C beschichtet, sodass auch hier der Wasserstoff nicht eindiffundieren kann. Ferner liegt die Vorspannung der Kugelbolzen aus 20MnCrMo7 im elastischen Bereich, sodass auch bei einer Beschädigung des Bauteils ein katastrophaler Bruch nicht zu erwarten ist.

**ZUSAMMENFASSUNG**

Die Ergebnisse bestätigen, dass Kugelbolzen aus dem neu entwickelten Stahl 20MnCrMo7 ohne eine kostspielige IH-Behandlung eingesetzt werden können. Die höhere Lebensdauer lässt eine höhere Beanspruchung zu, sodass diese in Hybrid- oder Elektrofahrzeugen eingesetzt werden können. Zudem kann die Beanspruchbarkeit auch berechnet und vorausgesagt werden.

**i**

Edelstahlzieherei Mark GmbH  
 Nordstraße 14  
 58300 Wetter (Ruhr)  
 Tel.: +49 2335 977-0  
 kontakt@ezm-mark.de  
 www.ezm-mark.de

Raufoss Technology AS  
 PO Box 77  
 2831 Raufoss, Norwegen  
 Tel.: +47 982 81 999  
 info.nor@raufossneumann.com  
 www.raufossneumann.com

**📖**

[1] Høiland, T.; Engineer, S.: Development of Chassis Components for hybrid Passenger cars, 5. International Conference on Steels in Cars and Trucks, Juni 2017 Amsterdam

[2] The Paris Law; Fatigue crack growth theory, University of Plymouth, Retrieved 21. June 2010

[3] Neuber's rule: Koettgen V. B.; Barkey M. E.; Socie, D. F.: Pseudo Stress and Pseudo Strain Based Approaches to Multiaxial Notch Analysis, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 18, No. 9, 1995, pp. 981-1006

[4] Brown, M.W., and Miller, K.J.: A Theory for Fatigue under Multiaxial Stress-Strain Conditions, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 187, 1973, pp. 745-756

[5] Fe-safe®: DS-Simula: fe-safe results were confirmed by lab tests, Raufoss Technology. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/RESOURCES/simulia-fe-safe-brochure.pdf>