



# Mikrolegierte Stähle für PKW Kugelzapfen

*Jochen Kruse<sup>1</sup>, Ulrich Urlau<sup>2</sup>, Stephan Hasler<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ZF Lemförder Fahrwerktechnik GmbH & Co.KG, 49441 Lemförde, GERMANY

<sup>2</sup> von Moos Stahl AG, 6021 Emmenbrücke, SWITZERLAND

Sächsische Umformtage, Freiberg, 6. - 8. Oktober 2004, S. 259-275

# Mikrolegierte Stähle für PKW Kugelzapfen

Jochen Kruse  
ZF Lemförder Fahrwerktechnik AG & Co. KG  
F-PDGP Fertigungsprozesse und –grundlagen  
Postfach 1220  
49441 Lemförde

Ulrich Urlau, Stephan Hasler  
von Moos Stahl AG  
Entwicklung  
Postfach 2044

CH-6021 Emmenbrücke

## Zusammenfassung

Durch den Einsatz eines mikrolegierten Stahls mit der Bezeichnung 35V1 konnten Kugelzapfen unter Einsparung der kostenintensiven Prozessschritte Glühen und Vergüten hergestellt werden. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Zapfen sind mit konventionell gefertigten Bauteilen aus Vergütungsstählen (z. B. 41Cr4) vergleichbar. Es konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften des fertigen Bauteils gezielt durch eine Veränderung der Prozessparameter beeinflusst werden können. Insbesondere ermöglicht die Variation des Abzuges am Walzdraht das Verhältnis zwischen Festigkeits- resp. Dauerfestigkeits- und Zähigkeitswerten am Bauteil einzustellen, je nach Anforderung an den zu produzierenden Kugelzapfen.

Schlüsselwort: Kugelzapfen, mikrolegierter Stahl, Kaltumformen, statische- und dynamische Festigkeit.

## Abstract

Using the micro-alloyed steel 35V1 ball studs were produced saving the cost relevant process steps annealing and quenching and tempering. The mechanical-technological properties of these ball studs are comparable with conventionally produced parts made of quenched and tempered steels (i.e. 41Cr4). It was shown, that the final properties of the part can be systematically influenced by changes in the process parameters. In particular the variation in area reduction during cold drawing of the wire rod allows to adjust the strength-toughness-ratio to specific product requirements.

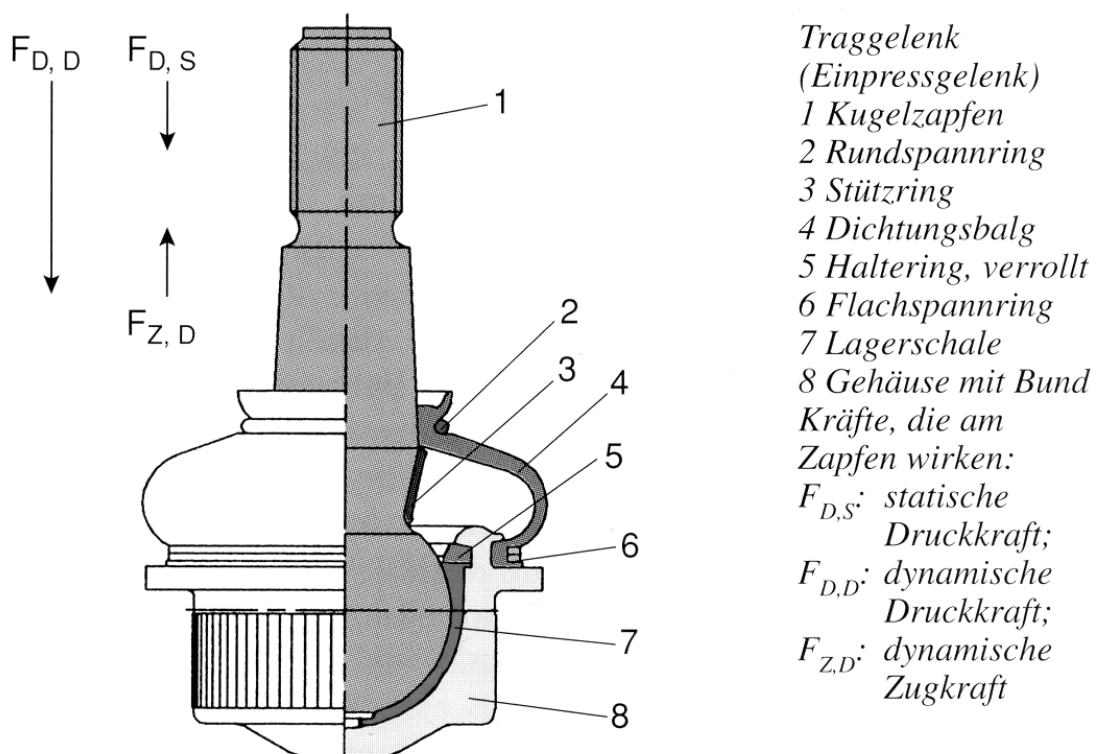
Key words: ball stud, micro-alloyed steel, cold forming, static and dynamic strength.

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Bedingt durch den stetigen Kostendruck ist die Automobilzulieferindustrie gezwungen, verstärkt alle Möglichkeiten zur Reduktion der Herstellkosten von Bauteilen auszuschöpfen. Daraus resultiert die Zielsetzung, kostenintensive Verarbeitungsschritte zu kürzen oder einzusparen, bei mindestens gleich bleibenden technologischen Eigenschaften des Produktes.

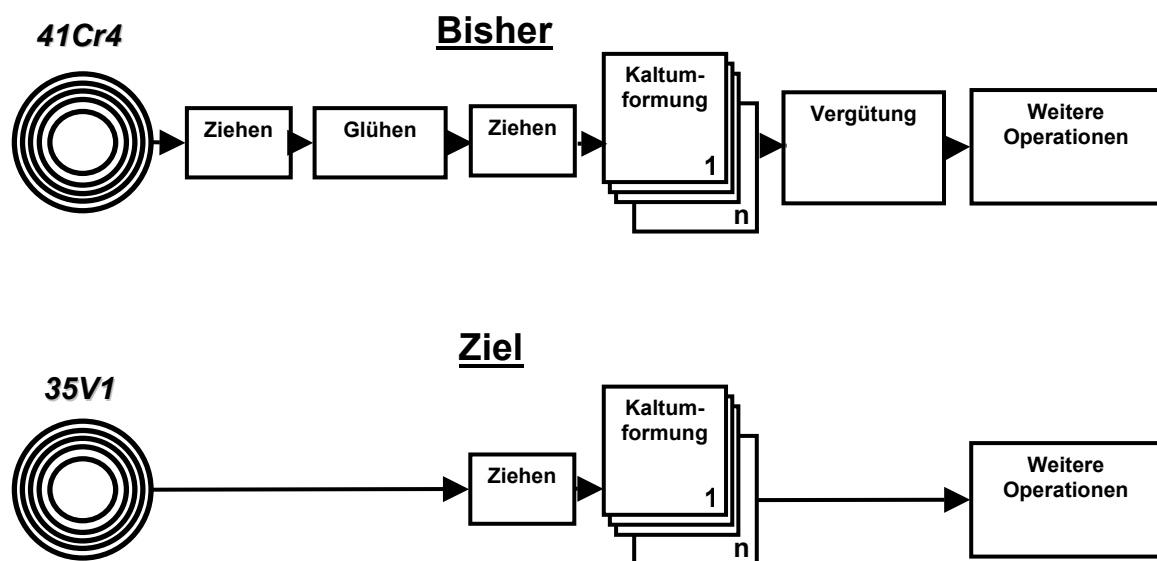
Im Folgenden wird am Beispiel eines Projektes zwischen der ZF Lemförder Fahrwerktechnik AG & Co. KG und der von Moos Stahl AG aufgezeigt, wie durch den Einsatz eines mikrolegierten Stahls für die Herstellung von Kugelzapfen dieses Ziel erreicht wurde und dadurch sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile erzielt werden können.

Kugelzapfen kommen im Automobil an vielen Stellen, als zentrale Bauteile im Fahrwerk, in Kugelgelenken zum Einsatz, wie z. B. in Querlenkern, Spurstangen, Radgelenken, Winkelgelenken und in Stabilisator-Koppelstangen. Kugelgelenke bestehen aus einem Kugelzapfen, der dauergeschmiert in einer Kunststoffschale gelagert ist, die wiederum in einem Gehäuse ruht. Damit der Zapfen und die Schale montiert werden können, ist das Gehäuse zu einer Seite offen und wird nach der Montage durch einen Haltering bzw. Deckel verschlossen. Das Gelenk wird durch einen Dichtungsbalg, der mit zwei Spannringen fixiert wird, vor Umwelteinflüssen geschützt. Der Stützring verhindert das Herunterrutschen des Balges vom kegeligen Bereich des Zapfens [1] (**Bild 1**).



**Bild 1** Kugelgelenk (Traggelenk) in Seitenansicht und Halbschnitt [1]  
**Fig. 1** Ball-and-socket joint, side view and half section [1]

Bei der konventionellen Herstellung von Kugelzapfen wird als Vormaterial ein Vergütungsstahl (z. B. Werkstoff 41Cr4) in Form von Walzdraht eingesetzt. Dabei wird der Walzdraht vor dem Kaltumformen entsprechend den Anforderungen an die Kaltumformbarkeit auf einen Gefügestand mit kugeligem Zementit gegläht (GKZ-Glühen). Nach dem Glühen wird durch Beizen, Phosphatieren und einem Kalibrationszug die geforderte Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit eingestellt. Anschließend erfolgt das Kaltfließpressen zum Kugelzapfenrohling in mehreren Stufen. Die erforderliche Festigkeit und Zähigkeit des Bauteils wird durch eine Vergütungsbehandlung eingestellt. Zum Schluss werden die Zapfen durch Drehen und (Gewinde-) Rollen bearbeitet. Der prinzipielle Herstellprozess ist in **Bild 2** dargestellt.



**Bild 2** Einsparung von Prozessschritten gegenüber konventionellem Herstellprozess

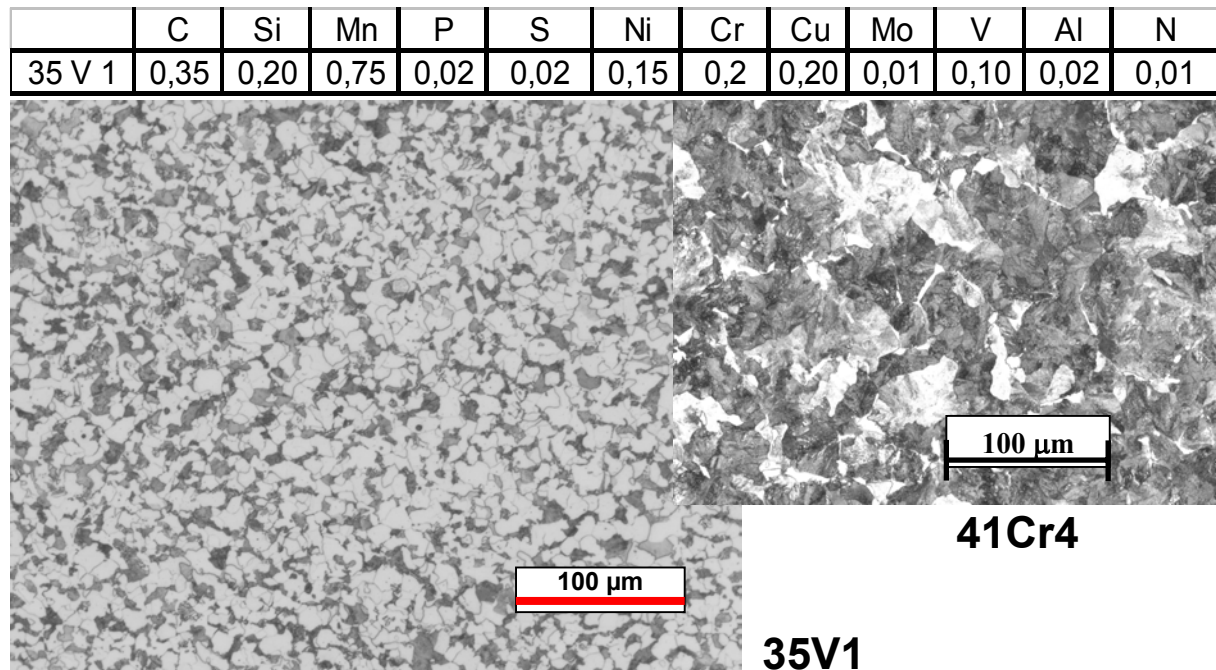
**Fig. 2** Saving of process steps compared with the conventional manufacturing sequence

## 2 Herstellung von Kugelzapfen unter Einsparung von Prozessschritten

### 2.1 Werkstoffauswahl

Das Ziel, durch die Verwendung eines geeigneten Vormaterials die kostenintensiven Prozessschritte Glühen und Vergüten einzusparen, setzt sowohl eine ausreichende Kaltumformbarkeit des Stahls im warmgewalzten Zustand als auch eine entsprechende Kaltverfestigung bei der Umformung voraus, damit die geforderten mechanischen Eigenschaften am Bauteil erreicht werden. Für den im Rahmen dieses Projektes untersuchten Kugelzapfen wird eine Festigkeit von 880-1030 MPa benötigt.

Für die großtechnischen Versuche wurde für die Herstellung von Kugelzapfen ein mikrolegierter ferritisch-perlitischer Stahl mit der Kurzbezeichnung 35V1 eingesetzt.

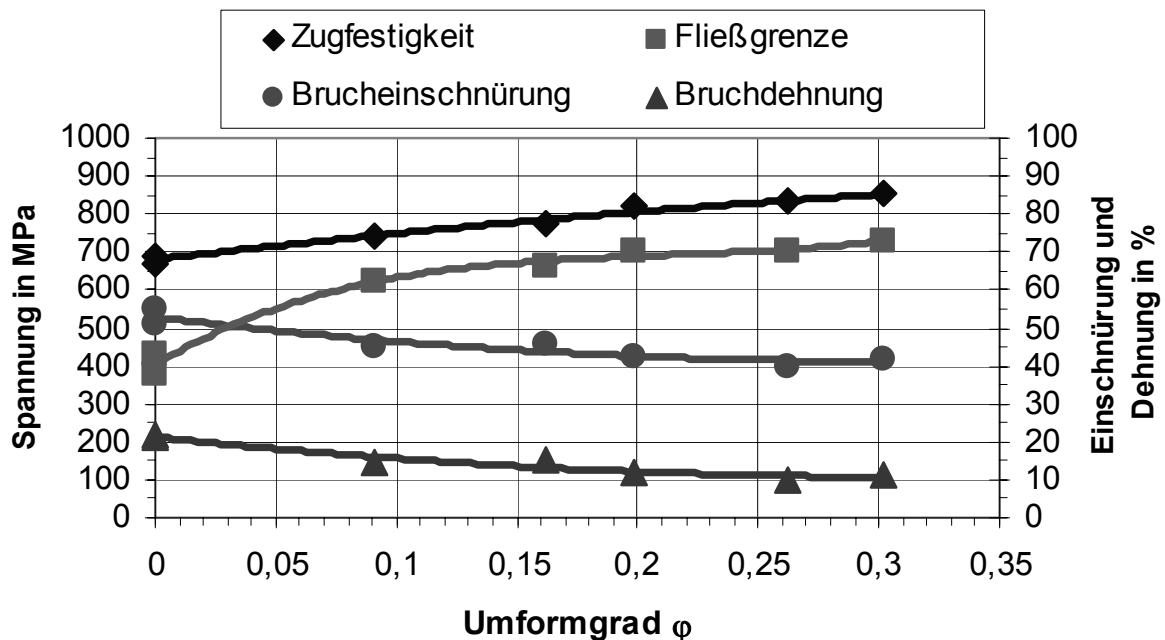


**Bild 3** Chemische Analyse und Mikrostruktur des mikrolegierten Stahls 35V1 in Vergleich zum Vergütungsstahl 41Cr4 im Walzzustand  
**Fig. 3** Chemical analysis and microstructure of the steel 35V1 compared to steel 41Cr4 in as rolled condition

Die chemische Analyse dieses Werkstoffes, für die im Folgenden beschriebenen Versuche ist in **Bild 3** angegeben. Bei der Auswahl dieses Werkstoffes waren insbesondere folgende drei Kriterien ausschlaggebend:

- feinkörniges und gleichmäßiges Gefüge im Walzzustand:  
 Mit einer Korngrößenkennzahl größer 8 nach ASTM E 112 [2] weist der Stahl 35V1 im Walzzustand ein genügend feinkörniges Gefüge auf. Dies ist vorteilhaft, da eine kleine Korngröße gemäß der Hall-Petch Beziehung gleichzeitig die Festigkeit und die Zähigkeit erhöht. Sie hat ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Umformbarkeit und steigert die Dauerfestigkeit. Beispielsweise erhöht sich diese beim Stahl C45E, der bei einem grobkörnigen ferritisch-perlitischen Gefüge eine Dauerfestigkeit von 225 MPa aufweist, durch ein normalisiertes Gefüge auf 295 MPa [3].  
 Der Stahl 35V1 zeichnet sich im Walzzustand ebenfalls durch ein über den gesamten Drahtquerschnitt homogen ausgebildetes ferritisch-perlitisches Gefüge ohne Anteile von Härtegefüge wie Martensit und/oder Bainit aus (**Bild 3**), welche die Kaltumformbarkeit nachhaltig beeinträchtigen würden. **Bild 3** zeigt deutlich den Unterschied des Gefüges im Walzzustand vom mikrolegierten Stahl 35V1 zum Vergütungsstahl 41Cr4. Beim konventionellen Vergütungsstahl 41Cr4 stellt sich erst durch ein GKZ-Glühen ein gut umformbares Gefüge ein.

- genügende Festigkeit und ausreichendes Kaltverfestigungsverhalten:  
Die Festigkeit eines Kugelzapfens resultiert aus der Grundfestigkeit des Ausgangsmaterials im Walzzustand und der Festigkeitssteigerung, die durch die Kaltverfestigung während des Ziehens und Kaltfließpressens stattfindet. In **Bild 4**



**Bild 4** Mechanische Eigenschaften des gezogenen Drahtes 35V1  
**Fig. 4** Mechanical properties of properties of drawn wire 35V1

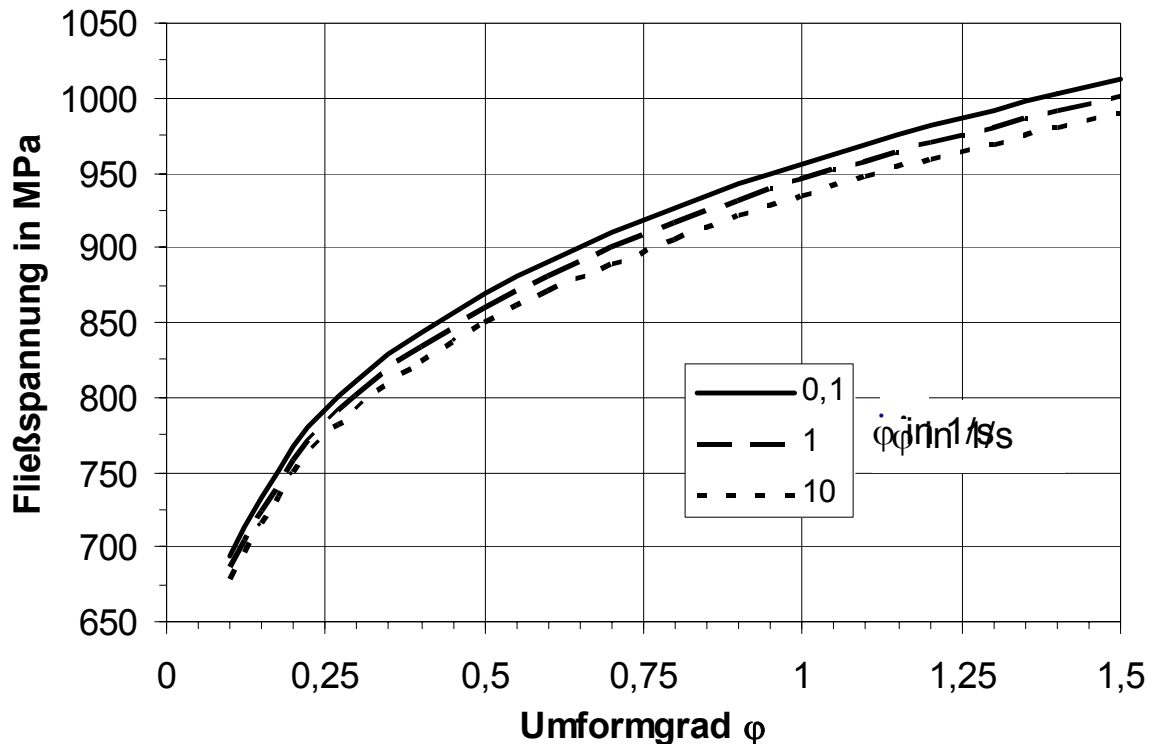
sind die im Zugversuch nach verschiedenen Abzügen ermittelten mechanischen Kennwerte des Stahls 35V1 dargestellt.

Durch das feinkörnige perlitisch-ferritische Gefüge und die Ausscheidungshärtung durch Mikrolegierung mit Vanadium weist der 35V1 bereits im Walzzustand eine rel. hohe Zugfestigkeit gegen 700 MPa bei einer gleichzeitig ausreichenden Brucheinschnürung von 50 % auf. Im Anfangsbereich geringer Dehnungen zeigt der Stahl eine recht starke Verfestigung. Durch das feinkörnige Gefüge wird auch bei einer Zugfestigkeit von 800 MPa noch eine Bruchdehnung von gegen 15 % und eine Brucheinschnürung von größer 40 % erreicht.

- ausreichende Kaltumformbarkeit:  
Da die Kaltumformfähigkeit am ehesten in Relation zur Brucheinschnürung gesetzt werden kann, müssen für das Kaltstauchen geeignete Stähle mindestens Brucheinschnürungen von  $Z \geq 50 \%$  entweder direkt im Walzzustand oder zumindest nach der Glühung auf kugeligen Zementit aufweisen. Dieses Kriterium ist beim 35V1 im Walzzustand erfüllt.

Vor den großtechnischen Pressversuchen wurde die Umformung des Ausgangsmaterials zu Kugelzapfen-Rohlingen mit FORGE 2 simuliert, um kritische Umformbereiche erkennen und ggf. das Werkzeug optimieren zu können. Für die Simulationsrechnungen wurden bei drei verschiedenen Temperaturen (Raumtemperatur, 135 und 250 °C) und bei drei Umformgeschwindigkeiten 0,1, 1 und 10 s<sup>-1</sup> Fließkurven aufgenommen und mittels Regressionsrechnung in Parameterform überführt.

In **Bild 5** sind die berechneten Fließspannungen bei 200 °C für drei Umformgeschwindigkeiten über den Umformgrad  $\varphi$  aufgetragen (200 °C ist die Temperatur, auf die sich das Material während des Umformprozesses ungefähr erwärmt). Bei der experimentellen Ermittlung der Fließkurven wurden die Dilatometerproben rissfrei bis zu einem Umformgrad  $\varphi$  von min. 1.5 umgeformt. Da der in der



**Bild 5** Fließkurven bei 200 °C für den Stahl 35V1  
**Fig. 5** Flow curves at 200 °C for steel 35V1

Simulation ermittelte maximale Umformgrad (Vergleichsformänderungen nach von Mises) von  $\varphi = 1.3$  (**Bild 6**) deutlich geringer war, waren alle Kriterien erfüllt, um mit großtechnischen Versuchen beginnen zu können.

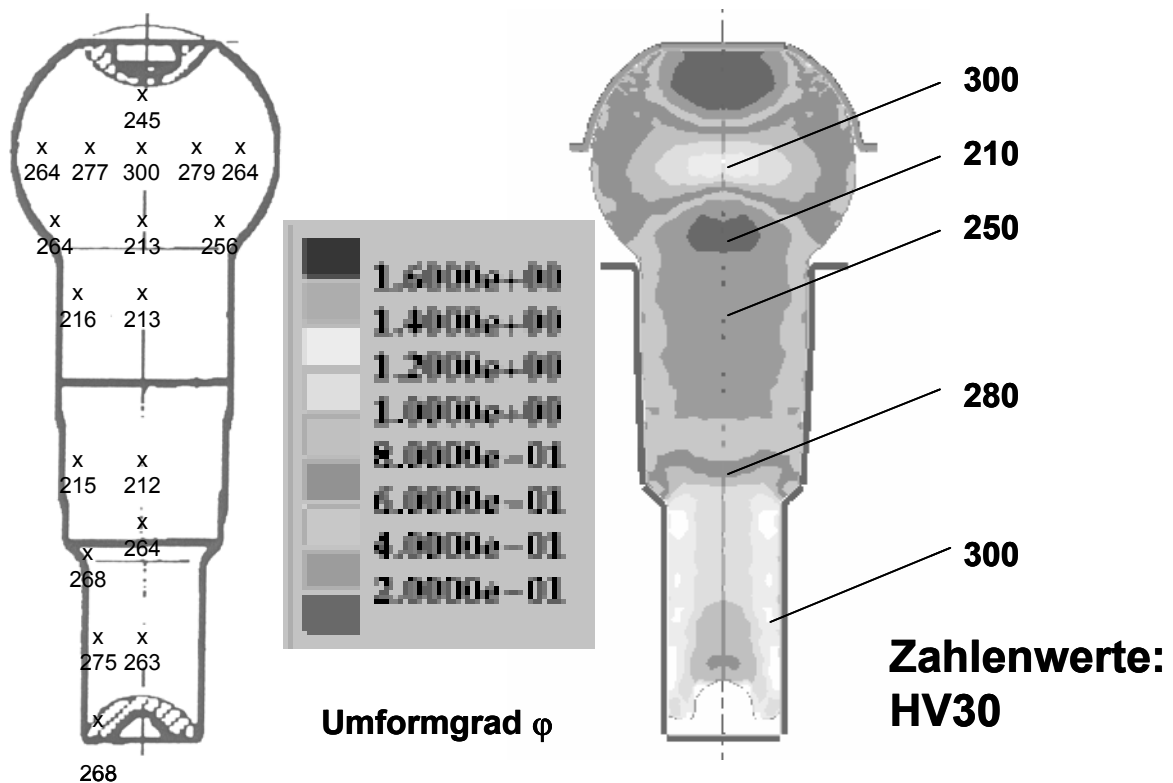
In **Bild 6** sind sowohl die an einem Längsschliff eines gepressten Kugelzapfens gemessenen als auch die aus der Umformsimulation mit Hilfe der Fließkurven berechneten Festigkeiten resp. Härtewerte einander gegenübergestellt. Qualitativ und quantitativ zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Höhe der akkumulierten Verformung und der gemessenen Härte, mit Ausnahme des mittleren zylindrischen Teils des Kugelzapfens.

## 2.2 Kaltpressversuche

Für die weiteren Untersuchungen wurden anschließend aus Walzdraht 35V1 ohne vorangehendes Glühen in einem 5stufigen Kaltumformprozess Kugelzapfen-Rohlinge gepresst.

Wie weiter unten gezeigt, wurde bei der Herstellung der Kugelzapfen vornehmlich der Einfluss des Drahtabzuges vor der Kaltumformung auf die sich einstellenden mechanisch-technologischen Eigenschaften des Bauteils untersucht. Im Folgenden wird deshalb unterschieden zwischen Bauteileigenschaften, die hergestellt wurden:

- ohne Drahtabzug
- nach 30 % Drahtabzug



**Bild 6** Vergleich der gemessenen und aus dem Umformgrad berechneten Härteverteilung über den Zapfenlängsschnitt

**Fig. 6** Comparison of the measured and calculated hardness distribution over a longitudinal section of a ball stud

### 2.3 Weiterverarbeitung der Rohlinge

Die Press-Rohlinge wurden in Drehautomaten komplett überdreht. Die Bearbeitung erfolgte mit Standard-Drehmeißeln, wobei keine Auffälligkeiten, wie Wickelspäne, Meißelbrüche usw. beobachtet wurden. Anschließend erfolgte das Gewinderollen und das Glätten der Kugeln (**Bild 7**).

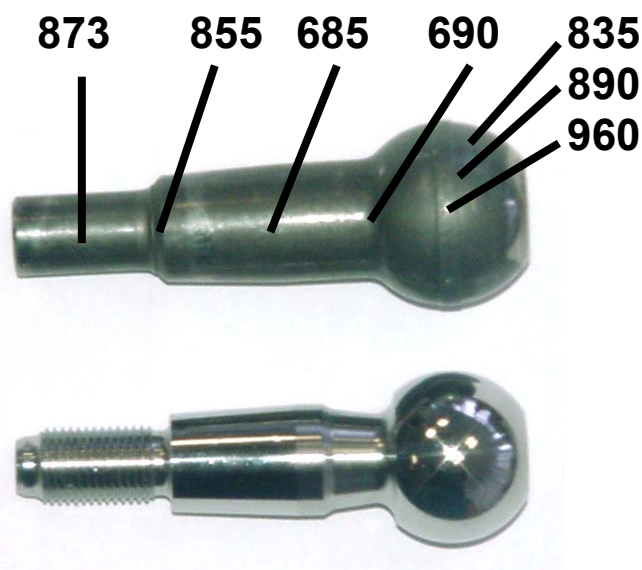
### 3 Untersuchung der Bauteil-Eigenschaften (ohne Drahtabzug)

#### 3.1 Geometrie

Für die in **Bild 7** dargestellten Kugelzapfen werden enge Toleranzen hinsichtlich der geometrischen Abmessungen und der Kugelform gefordert. Diese resultieren aus den kinematischen Gegebenheiten der Achse. Bereits geringe Abweichungen würden zu unerwünschten Fahreigenschaften des Pkws führen. Die enge Toleranz der Kugel gewährleistet ebenfalls eine enge Toleranz der Drehmomente des Kugelgelenks.

#### Zugfestigkeiten in MPa aus Härte:

#### Aus Zugversuch: (Proben aus Zapfen)



$R_{p0,2}$	<b>607 MPa</b>
$R_m$	<b>715 MPa</b>
$A_5$	<b>12,7 %</b>
$Z$	<b>48,4 %</b>
$E$	<b>170 GPa</b>

**Bild 7** Gemessene Härtewerte beim gepressten und bearbeiteten Kugelzapfen (ohne Drahtabzug). Mechanische Kennwerte ermittelt aus Zugversuch mit Kleinstzugproben

**Fig. 7** Measured hardness values of a cold formed and machined ball stud. Mechanical properties determined in a tensile test with small tensile specimens

Die aus dem mikrolegierten Stahl 35V1 hergestellten Kugelzapfen konnten prozesssicher im vorgegebenen Toleranzbereich bearbeitet werden. Auf Grund der geringeren Härte im Kugelbereich resultierte eine geringfügige Abweichung der Kugelform, die aber kostenneutral durch eine Anpassung der Verarbeitungsparameter korrigiert wurde.

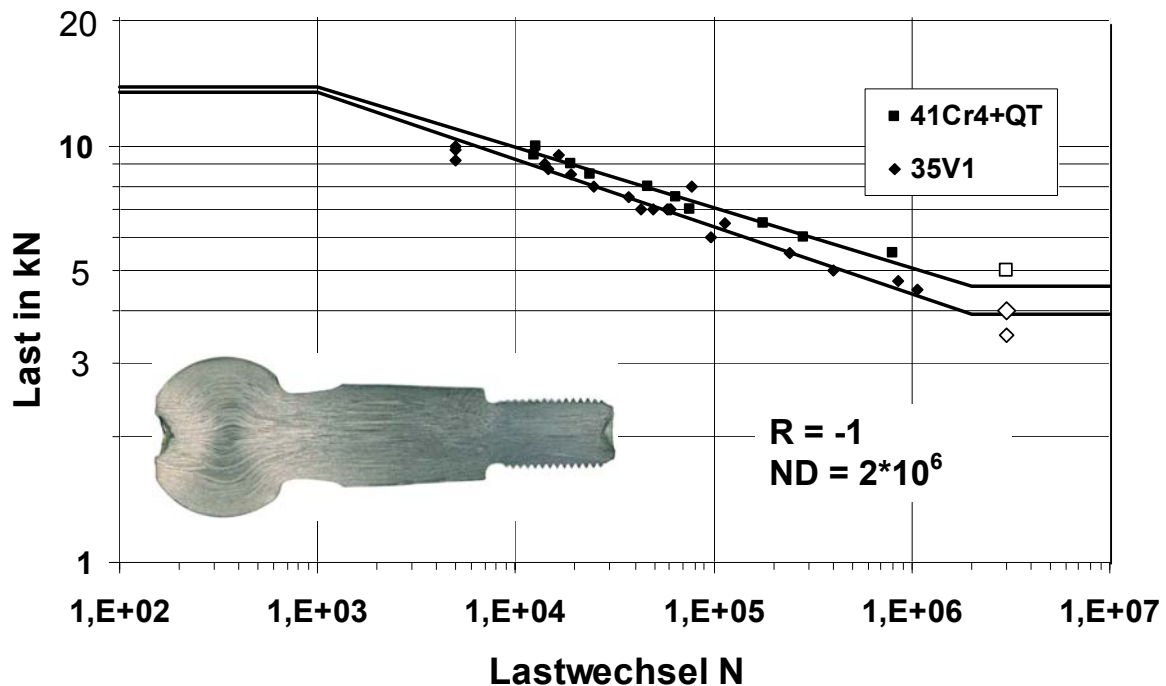
### 3.2 Statische Festigkeit

Für den Gewindebereich der Kugelzapfen wird, um ein sicheres Fixieren der Kugelzapfen am Hilfsrahmen oder Radträger zu gewährleisten, eine Mindestfestigkeit von 880 MPa gefordert. Neben Härtemessungen am Längsschliff wurden aus den gefertigten Kugelzapfen auch Klein-Zugproben entnommen, um die mechanischen Eigenschaften zu prüfen. Die ermittelten Kennwerte sind in **Bild 7** dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass die geforderte Festigkeit im Gewindebereich nicht ganz erreicht wurde. Auffällig ist auch der auf Grund der hohen Kaltverfestigung erniedrigte E-Modul von 170 GPa. Dieser wirkt sich nicht negativ auf die Steifigkeit des Fahrwerks aus, da die anderen Fahrwerkskomponenten eine deutlich größere Nachgiebigkeit (Compliance) besitzen. Eine derartige Abnahme des E-Moduls wird auch in der Literatur beschrieben [4]. So zeigt beispielsweise der Stahl H340 (ZStE340; Kaltband, 1 mm dick) im weichen Zustand einen E-Modul von 211 GPa, nach einachsiger Vordehnung von 10 % hingegen ist der E-Modul kleiner 180 GPa.

### 3.3 Dauerfestigkeit

In den Gelenken werden die Kugelzapfen vornehmlich auf wechselnde Biegung beansprucht. Aus dem Fahrzeug-, dem Vorderachsgewicht, der Motorleistung und den geometrischen Abmessungen von Fahrzeug und Vorderachse ergeben sich für einen konventionellen Kugelzapfen maximale statische und dynamische Biegespannungen von 780 MPa (statisch) bzw. 190 MPa (dynamisch). Diese Werte müssen auch von einem alternativen Werkstoff mindestens erfüllt werden.

Die Dauerfestigkeit der Kugelzapfen wurde in einstufigen Wöhlerversuchen unter Wechsellast bestimmt, wobei die Dauerfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Lastspielen definiert ist. In **Bild 8** sind die 50 %-Bauteilwöhlerlinien für Kugelzapfen aus 35V1 und 41Cr4+QT (vergütet auf 950 MPa) gleicher Geometrie einander gegenübergestellt. Die offenen Symbole stellen Durchläufer dar. Die absolute Höhe der Dauerfestigkeit ließ sich, bedingt durch die Versuchsdurchführung, nicht in eine Amplitude der Spannungsschwingbreite umrechnen. Deshalb ist in **Bild 8** auf der Ordinate nur die im Versuch aufgebrachte Belastung angegeben. Die bei den Kurz- und Standzeitversuchen aufgetretenen Brüche entstanden überwiegend im Halsbereich des Kugelzapfens entsprechend der dort auftretenden maximalen Spannungsüberhöhung. Es hat sich gezeigt, dass der Unterschied in der Kurzzeitfestigkeit zwischen den beiden Werkstoffen mit weniger als 5 % recht gering ist. Die Kugelzapfen aus 35V1 erreichten bei  $2 \cdot 10^6$  Lastspielen jedoch nur ca. 85 % der Dauerfestigkeit der Bauteile aus 41Cr4+QT (vergütet auf 950 MPa) und konnten daher die Anforderungen nicht ganz erfüllen.



**Bild 8** Vergleich der Dauerfestigkeit von Kugelzapfen aus 41Cr4+QT (vergütet) und 35V1 (R = -1; offene Symbole: Durchläufer)

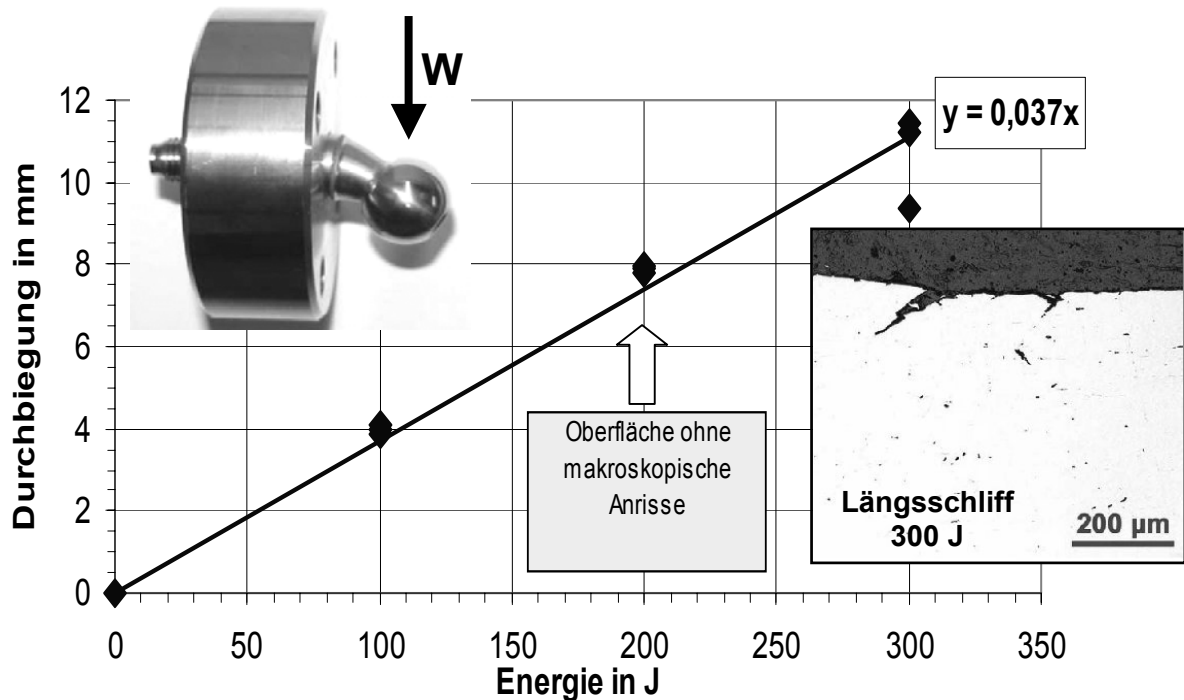
**Fig. 8** Comparison of fatigue behaviour of ball studs made of 41Cr4+QT (quenched and tempered) and 35V1 (R = -1; open symbols: fatigue resistant)

### 3.4 Verhalten gegenüber schlagartiger, mechanischer Beanspruchung

Aus Gründen der Produkthaftung müssen sich die sicherheitskritischen Bauteile im Fahrwerksbereich im Falle einer übermäßigen Beanspruchung (z.B. bei einem Unfall) duktil verformen. Das Bauteil darf unter keinen Umständen verformungsarm versagen.

Um dieses Sicherheitskriterium zu überprüfen wurde das Verhalten der Kugelzapfen aus 35V1 bei schlagender Beanspruchung, insbesondere bei tiefen Temperaturen, untersucht. Hierzu wurden bei Raumtemperatur und bei -40 °C Fallhammerversuche (Masse 28,5 kg) bis zu einer Energie von 500 J durchgeführt. Dabei wurde der Kugelzapfen, wie in der späteren Einbaulage im PKW, in einem Hebelauge fixiert und dieses horizontal in einer Prüfapparatur aufgenommen. Nach der korrekten Positionierung wurde die Fallhammermasse aus einer definierten Höhe mittig auf die Kugel des Kugelzapfens fallengelassen. Der kleinste Probenquerschnitt im Halsbereich betrug 1,04 cm<sup>2</sup>. In **Bild 9** ist die Zapfendurchbiegung über die Schlagenergie bei Raumtemperatur aufgetragen. Die Kugelzapfen konnten bei Raumtemperatur nur bis zu 300 J beaufschlagt werden. Bei dieser Energie waren die Kugelzapfen mit 11 mm bis 12 mm bereits so stark verbogen, dass eine weitere Prüfung mit höheren Energien nicht mehr möglich war. Erst bei 300 J zeigten sich feine ca. 150 µm tiefe Anrisse. Auf Grund von theoretischen Überlegungen sind bei Kugelzapfen mit einer Festigkeit von 800 MPa erst Risse ab einer Tiefe von 200 µm für die Abnahme der Dauerfestigkeit kritisch [5]. Die in den Versuchen beobachteten Anrisse stellen dem-

entsprechend kein Sicherheitsrisiko dar, zumal ein derartig stark verbogener Kugelzapfen durch eine Schiefstellung der Räder weithin sichtbar ist.



**Bild 9** Zapfendurchbiegung in Abhängigkeit der Schlagenergie bei RT im Fall hammerversuch. Kleines Bild: prinzipieller Versuchsaufbau

**Fig. 9** Bending of ball studs as a function of impact energy at RT during drop-hammer-test. Small picture: schematic diagram showing the experiment

Bei  $-40\text{ °C}$  konnten die Versuche bis Energien von 500 J durchgeführt werden. Bei 400 J betrug die Durchbiegung ca. 12 mm. Ab dieser Energie zeigten sich ebenfalls feine Anrisse der gleichen Größenordnung wie oben beschrieben auf den Kugelzapfen. Erst bei einer Energie von 500 J wurde der Kugelkopf durch einen duktilen Bruch vom Schaft getrennt.

Das Verhalten der Kugelzapfen aus 35V1 gegenüber schlagartiger, mechanischer Beanspruchung ist somit vergleichbar mit demjenigen konventionell hergestellter, schlussvergüteter Kugelzapfen (z.B. aus 41Cr4). Die Ursache für das sehr gute Verhalten liegt vermutlich in der Vorzugsrichtung der Kaltverformung, d.h. den Fließlinien und Eigenspannungen senkrecht zur Belastungsrichtung.

### 3.5 Korrosionsbeständigkeit

Zum Schutz vor Korrosion werden die Kugelzapfen bei Bedarf beschichtet. Entsprechende Versuche wurden auch an Kugelzapfen aus 35V1 durchgeführt. Mit ZnNi (gal. ZnNi & farblos passiviert (Cr III)) beschichtete Bauteile aus 35V1 zeigten im neutralen Salzsprühtest [6] nach 720 h erwartungsgemäß das gleiche Verhalten wie solche aus 41Cr4 mit gleicher Beschichtung unabhängig von der Beschaffenheit der

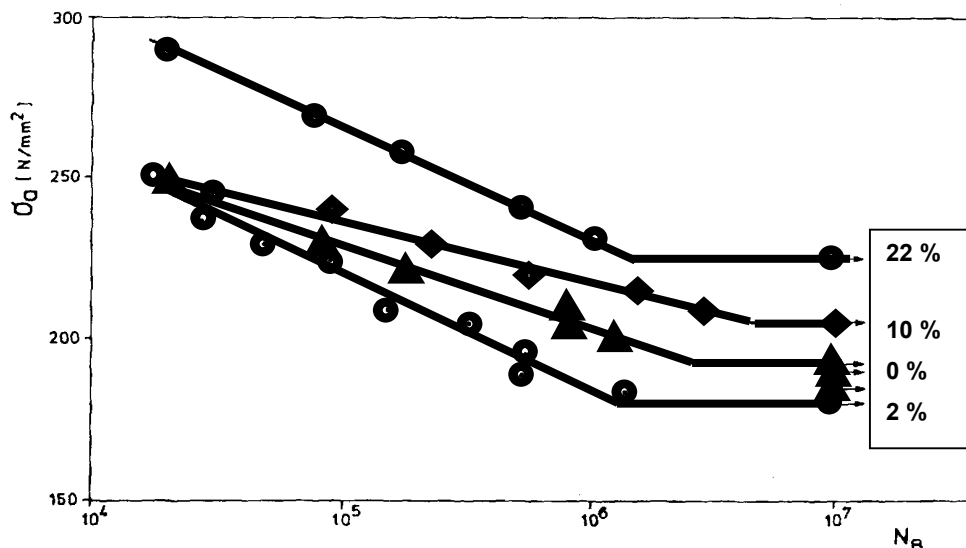
Oberfläche. Auch auf dem gerollten Gewinde und dem unbearbeiteten Kegelbereich zeigten die Zapfen nach 720 h nur leichte Weißrostkorrosion.

### 3.6 Diskussion

Die obigen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Herstellung von Kugelzapfen ohne Drahtabzug vor der nachfolgenden Kaltumformung vor allem die Festigkeit bzw. die Dauerfestigkeit noch nicht befriedigend war.

Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung führen in der Regel auch zu einer Erhöhung der Dauerfestigkeit. Es boten sich verschiedene Möglichkeiten an, die Festigkeit resp. die Dauerfestigkeit der Kugelzapfen durch eine Optimierung des Herstellprozesses zu steigern:

- durch eine Kornfeinung, da neben der Fließspannung auch die Dauerfestigkeit der Hall-Petch-Beziehung gehorcht. Mit abnehmender Korngröße nimmt die Festigkeit zu. So erhöht sich z.B. bei einem C10 die Zug-Druck-Dauerfestigkeit von 175 MPa bei einer Korngröße von 60  $\mu\text{m}$  auf 210 MPa bei einer Korngröße von 10  $\mu\text{m}$ , bei sonst gleicher Versetzungsdichte [3].
- durch eine Erhöhung der Drahtfestigkeit vor dem Kaltumformen mittels eines stärkeren Abzuges des warmgewalzten Drahtes. Diese Maßnahme kann zu einer Verschlechterung des Umformvermögens und/oder der Zähigkeit führen. Die Erhöhung der Dauerfestigkeit durch eine Kaltverformung steigt nicht linear mit der Umformung an. Vielmehr durchläuft die Dauerfestigkeit ein relatives Minimum. Dieses liegt z.B. bei einem C10E bei einer Vorverformung von 2 %. Erst nach einer Vorverformung von ca. 8 % erreichen die Dauerfestigkeiten wieder das ursprüngliche Niveau [3] (**Bild 10**).

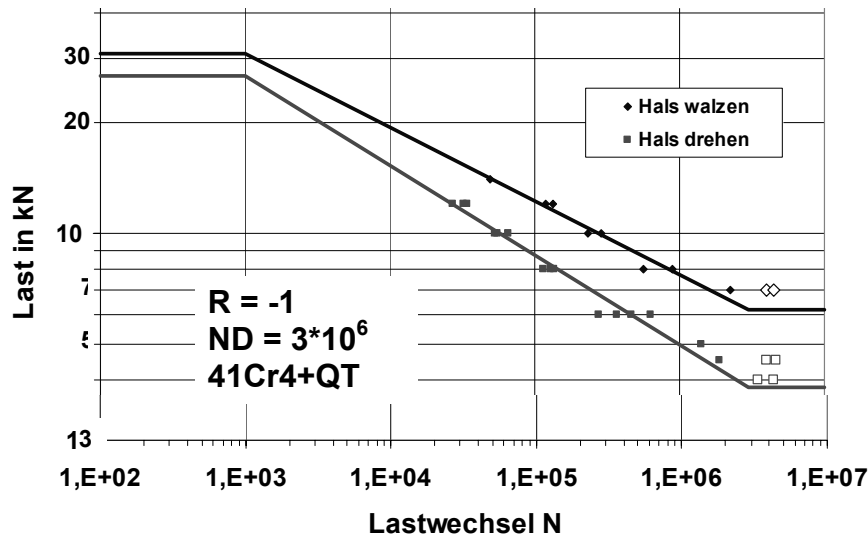


Einfluß einer Vorverformung auf die Wöhlerkurve eines Ck 10

**Bild 10** Möglichkeit der Dauerfestigkeitserhöhung durch Kaltverfestigung [3], Vorverformung in %

**Fig. 10** Possibility of increasing fatigue by work hardening [3], pre-deformation in %

- durch eine gezielte Veränderung der Umformparameter beim Kaltfließpressen, um durch höhere Umformgrade die Festigkeit im Halsbereich zu steigern. Das Ausmaß der Erhöhung der Dauerfestigkeit durch eine Kaltumformung bzw. Kaltverfestigung hängt davon ab, ob eine homogene oder partielle Kaltumformung durchgeführt wurde und ob der Richtungssinn der Umformung mit der Bauteilbeanspruchung übereinstimmt. An Vergütungsstählen wurde nachgewiesen, dass die Steigerung der Zug-Druck-Wechselfestigkeit proportional zur Steigerung der Zugfestigkeit verläuft, unabhängig davon, ob die höhere Zugfestigkeit durch eine Vergütungsbehandlung oder durch Kaltstauchen bewirkt wurde [5].
- durch eine gezielte Steigerung der Festigkeit im Halsbereich durch Walzen des Halsbereiches und einer damit verbundenen Kaltverfestigung. Wie entsprechende Versuche an Kugeln aus 41Cr4 gezeigt haben, führt das Kaltwalzen des Halses durch den Einbau von Versetzungen bzw. Druck-Eigenstressungen zu einer deutlichen Steigerung der Dauerfestigkeit von bis zu 60 % (**Bild 11**).
- durch eine Erzeugung von Eigenspannungen in der Randzone des Halsbereiches durch Induktionshärtung. Dadurch lässt sich die Dauerfestigkeit mehr als verdoppeln.



**Festigkeiten**  
**41Cr4+QT**  
**Oberfläche:**  
**1115 MPa**  
**Kern:**  
**920 MPa**

**Bild 11** Möglichkeit der Dauerfestigkeitserhöhung durch Oberflächenverfestigung

**Fig. 11** Potential of increasing fatigue by surface work-hardening

## 4 Untersuchung der Bauteil-Eigenschaften (30 % Drahtabzug)

### 4.1 Geometrie

Ausgehend von den äußerst positiven Ergebnissen der ersten Versuche und aufsetzend auf den im Abschnitt 3.6 geschilderten Überlegungen zur Steigerung der Festigkeit resp. Dauerfestigkeit wurden im Folgenden aus demselben Stahl erneut Kugeln ähnlicher Geometrie, aber zusätzlich mit Innensechskant, hergestellt

**(Bild 12).** Um die Festigkeit des Bauteils zu steigern wurde, als einfachste umzusetzende Maßnahme, einzig der Abzug des warmgewalzten Drahtes sukzessive erhöht. Dabei wurden Versuche mit Drahtabzügen bis zu 30 % durchgeführt.

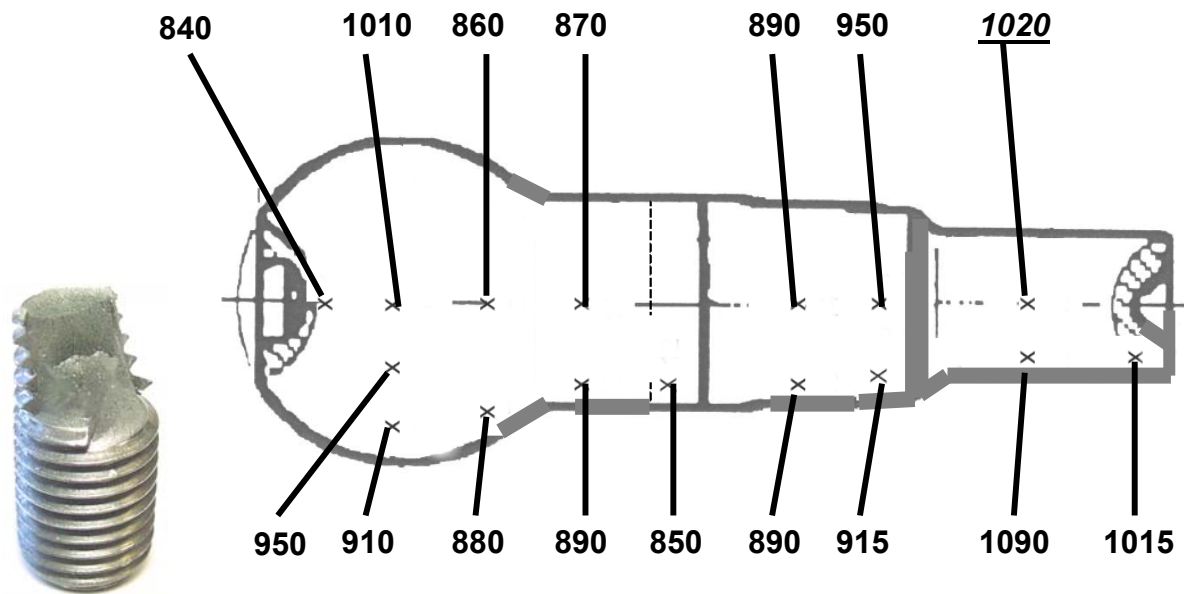
## 4.2 Statische Festigkeit

Zur Bestimmung der Festigkeiten wurde die Härte über den Längsschliff der gepressten Zapfen gemessen. Die aus den Härtewerten nach DIN 50150 [8] umgerechnete Festigkeitsverteilung ergab bei Kugelzapfen hergestellt aus Walzdraht mit einem 30%igen Abzug deutlich höhere Festigkeiten von 850 MPa bis 1090 MPa (**Bild 13**). Die höchsten Festigkeiten traten dabei im Randbereich des Gewindes auf. Nach dem Bearbeiten und dem Gewindewalzen ergaben Zugversuche am kompletten Zapfen Festigkeiten von 1120 MPa im Mittel. Das sind gegenüber den Härtemessungen ca. 100 MPa höhere Werte. Nach [8] ergeben sich bei der Gruppe der perlitischen Stähle im Bereich zwischen 300HV10 und 500HV10 im Mittel um 100 MPa höhere Zugfestigkeiten als nach den Umwertungs-Tabellen zu erwarten wäre.



**Bild 12** 5 stufiger Umformprozess zur Herstellung von Kugelzapfen mit Innensechskant (Abzug 30 %)

**Fig. 12** Production of ball studs with a hexagon socket in a 5 step cold forming process (area reduction during cold drawing of the wire: 30 %)



**Zugversuch Gewinde:  $R_m = 1120 \pm 40$**

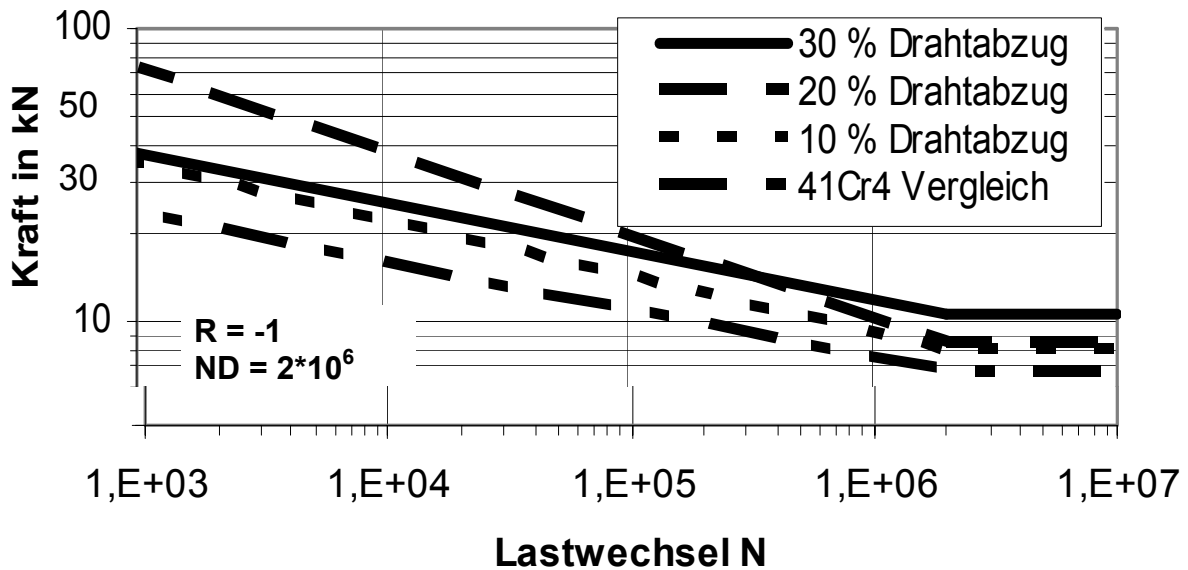
- Bild 13** Zugfestigkeiten berechnet aus im Längsschliff ermittelten Härtewerten. Festigkeit des im Zugversuch zerrissenen Gewindes (Abzug 30 %)
- Fig. 13** Calculated tensile strength based on hardness values. Strength of the thread tested in a tensile test (area reduction during cold drawing of the wire: 30 %)

Diese hohen Zugfestigkeiten fallen auch nach einer Wärmebehandlung bis zu einer Temperatur von 500 °C, wie sie während eines Beschichtungsverfahrens auftreten kann, nicht ab. Bis Temperaturen von 300 °C erfährt der Stahl, abhängig vom Drahtabzug, durch Kohlenstoffalterung eine zusätzliche Festigkeitssteigerung von bis zu 90 MPa (bake-hardening).

Die Gewinde-Bruchfläche dieser bei Raumtemperatur geprüften Kugelzapfen zeigten trotz der hohen Festigkeit unter dem Elektronenmikroskop einen typisch duktilen Bruch (cup and cone).

### 4.3 Dauerfestigkeit

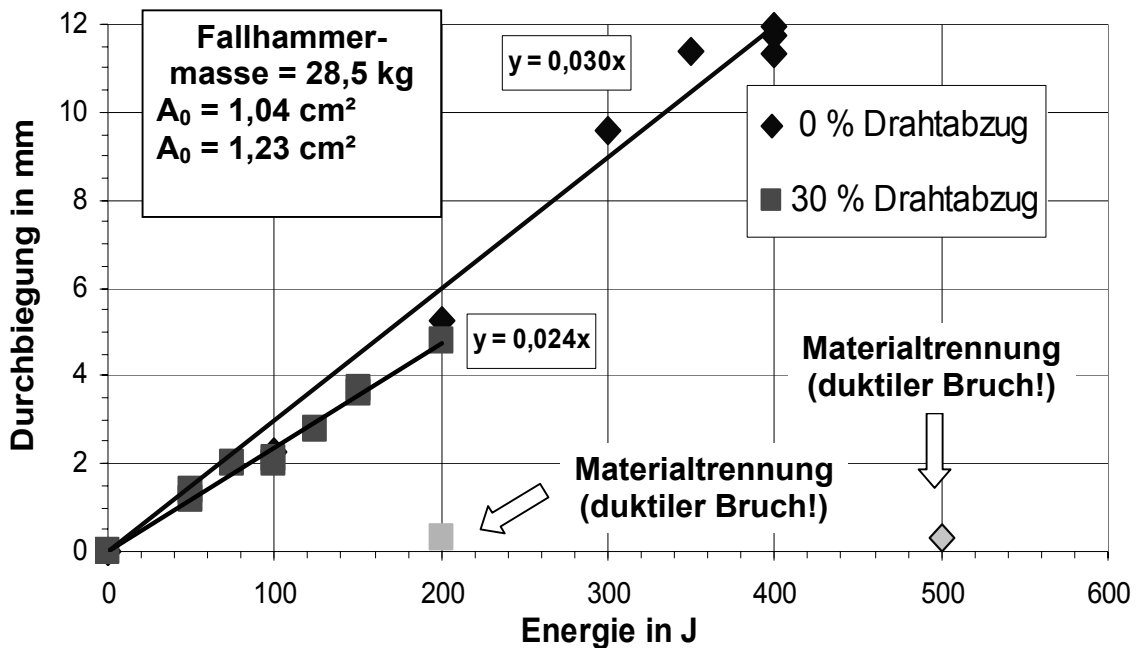
Durch eine Erhöhung des Drahtabzuges konnte die Dauerfestigkeit des Stahls 35V1 ebenfalls kontinuierlich gesteigert werden. Die dabei erzielten Werte lagen bis zu 40 % höher als diejenigen des Serienzapfens aus dem Vergütungsstahl 41Cr4 (**Bild 14**). Je Variante wurden 10 Kugelzapfen mit 2 bis 3 Durchläufern geprüft. Im Diagramm (**Bild 14**) sind die einzelnen Messwerte der besseren Übersicht halber nicht eingetragen.



**Bild 14** Vergleich der Dauerfestigkeit von Kugelzapfen aus 41Cr4+QT (vergütet) und 35V1 mit unterschiedlichen Drahtabzügen (Pü = 50 %; R = -1)  
**Fig. 14** Comparison of fatigue behaviour of ball studs made of 41Cr4+QT and 35V1 (various area reductions during cold drawing of the wire)

#### 4.4 Verhalten gegenüber schlagartiger, mechanischer Beanspruchung

An Kugelzapfen, hergestellt aus Walzdraht mit unterschiedlichen Abzügen, wurden erneut, unter gleichen Bedingungen wie oben beschrieben, Fallhammerversuche durchgeführt. In **Bild 15** ist die Zapfendurchbiegung bei  $-40\text{ °C}$  gegen die Schlagenergie für die zwei Zapfenvarianten mit einem Abzug 0 % und 30 % aufgetragen. Bei den gepressten Kugelzapfen aus 30%-ig abgezogenem Walzdraht betrug bei 200 J die maximale Durchbiegung 5 mm. Bereits ab 5 mm Durchbiegung erfolgte bei diesen Proben ein Bruch. Auch hier zeigten sich erst kurz vor der Bruchbelastung feine Risse auf der Zapfenoberfläche.



**Bild 15** Zapfendurchbiegung in Abhängigkeit der Schlagenergie bei  $-40 \text{ °C}$  im Fallhammerversuch für zwei verschiedene Kugelzapfen (Abzug 0 % und 30 %)

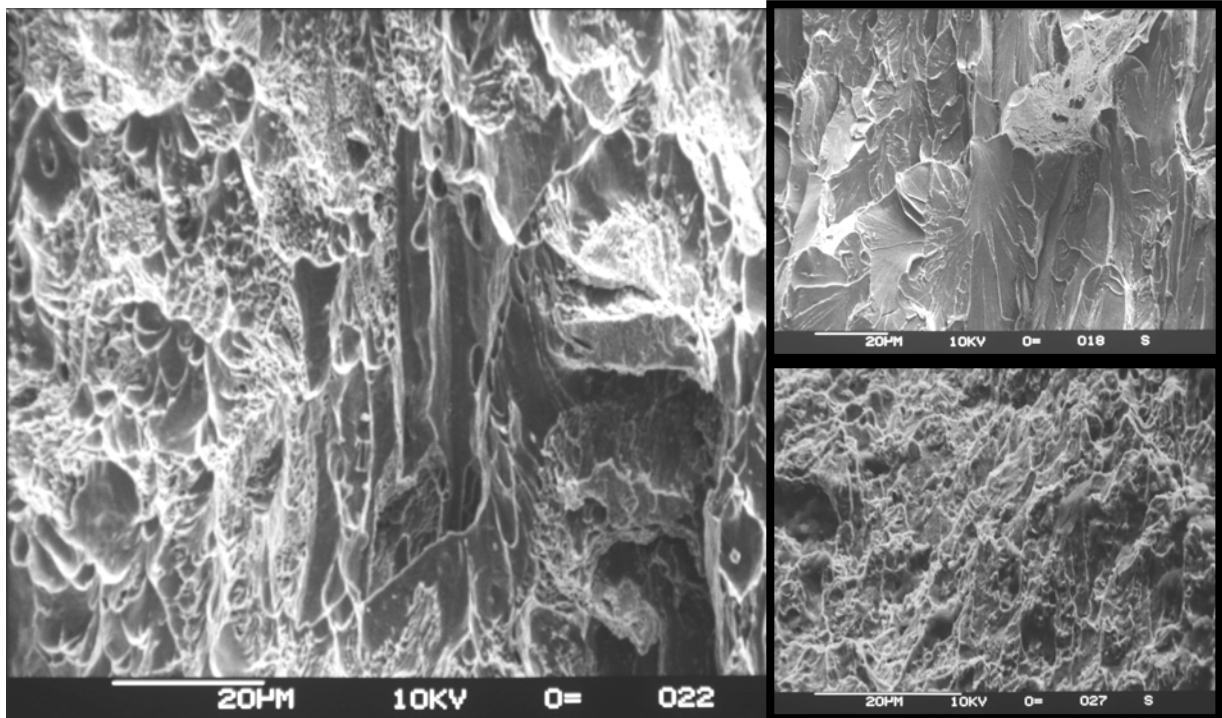
**Fig. 15** Bending of ball studs as a function of impact energy at  $-40 \text{ °C}$  during drop-hammer-test (area reduction during cold drawing: 0 % and 30 %)

Die mittels REM aufgenommenen Bruchflächen sind in **Bild 16** dargestellt. Neben Bereichen mit einem ausgeprägten Terrassenbruch zeigen große Bereiche der Bruchfläche einen duktilen Charakter (cup and cone). Es sind auch Bereiche mit gemischter Bruchmorphologie zu erkennen.

## 5 Diskussion

Die bisher durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die großtechnische Herstellung von Kugelzapfen mit mikrolegierten Stählen, in diesem Fall mit einem ferritisch-perlitischen Stahl der Bezeichnung 35V1, unter Einsparung der Prozessschritte Glühen und Vergüten möglich ist. Die auf diese Weise produzierten Produkte zeigen gute mechanische Eigenschaften, insbesondere ein gutes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit. Die Werte sind mit denen konventionell hergestellter Kugelzapfen aus Vergütungsstählen (z. B. 41Cr4) vergleichbar.

Es konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften des fertigen Bauteils (bei gleichbleibender chemischer Zusammensetzung) gezielt durch eine Veränderung der Prozessparameter beeinflusst werden können. Insbesondere ermöglicht die Variation des Abzuges am Walzdraht vor dem Kaltumformen das Verhältnis zwischen Festigkeits- und Zähigkeitswerten am Bauteil einzustellen, je nach Anforderung (Lastenheft) an den zu produzierenden Kugelzapfen.



**Bild 16** REM-Bild der bei -40 °C gebrochenen Kugelzapfen mit 30 % Drahtabzug

**Fig. 16** SEM-images of broken ball studs (area reduction during cold drawing of the wire: 30 %) tested at -40 °C

Der Verzicht auf die Prozessschritte Glühen und Vergüten bedeutet gegenüber der konventionellen Herstellroute mit Vergütungsstählen (z. B. 41Cr4) sowohl einen wirtschaftlichen Vorteil als auch einen ökologischen Fortschritt.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Nikolaus Fecht (Herg.); Komponenten für Fahrwerk und Lenkung; Verlag moderne Industrie, Landsberg 1997.
- [2] ASTM E 112 (1996).
- [3] W. Dahl (Herg.); Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung; Verlag Stahl Eisen GmbH, Düsseldorf 1978.
- [4] E. Doege u.a.; Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, 33, S. 667-672, 2002.
- [5] H. Huff; Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, 33, S. 155–160, 2002.
- [6] Salzsprühtest nach DIN 50021.
- [7] Dubbel E14.
- [8] DIN 50150, Tab. A1.